

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE
CONCENTRATION RÉSEAUX DE TÉLÉCOMMUNICATIONS
M.Ing.

PAR
Fabien SACUTO

CARACTÉRISATION DES MILIEUX HAUTES TENSIONS EN VUE D'ADAPTER UN
RÉSEAU SANS FIL DE CAPTEURS

MONTRÉAL, LE 28 JUILLET 2010

©Tous droits réservés, Fabien Sacuto, 2010

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. François Gagnon, directeur mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Basile L. Agba, codirecteur mémoire
Chercheur à l'IREQ

M. Ghyslain Gagnon président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Fabrice Labeau, examinateur externe
Université de Mc-Gill

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 12 JUILLET 2010

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu pendant ma maîtrise : mes parents Romain Sacuto et Anny Guizouarn, ma sœur Aurore, mon directeur de recherche François Gagnon, mon codirecteur Basile L.Agba, ainsi que les professionnels du LACIME Jonathan Gagnon, Laurent Mouysset et Rafael Labedan. Je remercie également l'IREQ et le LACIME pour le soutien financier et les prêts d'équipements.

CARACTÉRISATION DES MILIEUX HAUTES TENSIONS EN VUE D'ADAPTER UN RÉSEAU SANS FIL DE CAPTEURS

Fabien SACUTO

RÉSUMÉ

Les postes de transports d'énergie d'Hydro-Québec sont le siège d'interférences électromagnétiques causées par les hautes tensions véhiculées et par le fonctionnement de l'équipement présent sur le site. Les études de cet environnement ont révélé que le bruit électromagnétique varie d'une puissance allant de -176 dBm à 40 dBm pour une gamme de 10 MHz à 10 GHz. Ne pouvant tirer des câbles réseaux sur une aire de 1 Km², un réseau de capteurs sans fil est de loin la meilleure solution pour contrôler les équipements présents depuis l'extérieur. Il faut donc rassembler les différentes technologies du sans fil (Wi-Fi, Wimax, LTE...) afin de mettre en réseau les capteurs de ces équipements, tout en prenant en compte la localisation du bruit et ses caractéristiques (fréquence, gain) pour la sélection du matériel de communication et son emplacement. Ce mémoire vise à caractériser l'environnement électromagnétique des postes de transport d'énergie en recensant les bruits déjà mesurés et en proposant une méthode de capture et d'analyse du bruit impulsionnel.

Mots clés : Décharge partielle, bruit couronne, bruit électromagnétique, transport d'énergie, postes hautes tensions.

CHARACTERIZATION OF HIGH VOLTAGE ENVIRONMENT IN ORDER TO ADAPT A SENSORS WIRELESS NETWORK

Fabien SACUTO

ABSTRACT

Hydro-Québec energy substations are under electromagnetic interferences due to high voltage transported and equipment behavior. According to case studies, the noise varies from -176 dBm at 10 GHz to 40 dBm at 10 MHz. It is troublesome to link sensors with communication cable, so a wireless sensors network is the best option to control the equipments in substations from the outside. All major wireless technologies (Wimax, LTE, Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth...) have to be used to link these equipments sensors. In addition, noise characteristics (frequency and power) and location have to be considered for the communication devices and sensors disposition. This master's thesis aims to characterize the electromagnetic environment within high voltage substations by classifying noises already measured and it proposes a method to capture and analyze impulsionnel noises.

Keywords : High voltage substation, partial discharge, corona noise, electromagnetic noise.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 MILIEUX HAUTES TENSIONS ET COMMUNICATIONS	
SANS FIL	4
1.1 Introduction.....	4
1.2 Le bruit des postes de transport d'énergie	5
1.2.1 Les lignes de transport : bruit gap et couronne	5
1.2.2 Transformateurs et isolateurs de traverse : décharges partielles.....	10
1.2.3 Émission électromagnétique provenant des bus	15
1.2.4 Bruit ambiant des postes	16
1.2.5 Effet du changement climatique sur le bruit	19
1.2.6 Classement des résultats	21
1.3 La technologie sans fil	22
1.3.1 État de la technologie.....	23
1.3.2 Rôle des systèmes sans fil dans les postes	26
1.4 Conclusion	29
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE DE MESURE.....	31
2.1 Présentation.....	31
2.2 Décharges partielles et effet couronne.....	33
2.3 Le spécimen barre de générateur ou électro-tronqué.....	34
2.4 Le spécimen point-plan.....	35
2.5 Choix des antennes	36
2.6 Oscilloscope.....	37
2.7 Montage	37
2.8 Protection de l'équipement de mesure.....	39
2.9 Résultats de simulation avec un générateur de signaux.....	39
2.10 Conclusion	43
CHAPITRE 3 MESURE DES INTERFÉRENCES.....	44
3.1 Présentation du laboratoire CTT	44
3.2 Mesure du spécimen électro-tronqué.....	44
3.3 Mesure du spécimen point-plan	49
3.4 Le spécimen Tesla-coil	51
3.5 Évaluation du taux de répétition	54
3.6 Étude à 2.4 GHz.....	57
3.6.1 Montage	57
3.6.2 Mesures avec antenne uniquement	58
3.6.3 Mesures avec antenne et filtre passe-haut 1800 MHz	61
3.6.4 Mesures avec antenne, filtre, et amplificateur LNA 25 dB	61
3.7 Conclusion	65

CHAPITRE 4	Interprétation des résultats	66
4.1	Introduction.....	66
4.2	Influence de la tension d'alimentation sur le bruit.....	66
4.3	Influence de l'espacement inter-électrodes sur le bruit	68
4.3.1	Influence de l'espacement sur l'amplitude spectrale	68
4.3.2	Influence de l'espacement sur la fréquence moyenne	70
4.4	Bruits et communications	71
4.5	Conclusion	77
CONCLUSION.....		79
RECOMMANDATIONS		82
ANNEXE I	Sonde simulatrice du bruit gap	88
ANNEXE II	Spectres des isolateurs de traverse (bushing).....	89
ANNEXE III	Tableau des puissances	90
ANNEXE IV	Graphe 3D du bruit ambiant	91
ANNEXE V	Graphe 3D du bruit impulsionnel	92
ANNEXE VI	Harmonisation des unités de mesure.....	93
ANNEXE VII	Option FastFrame de l'oscilloscope TDS6124C	94
ANNEXE VIII	Filtre et amplificateur LNA	96
ANNEXE IX	Réponse fréquentielle de l'antenne Wi-Fi 2.4 GHz D-Link	100
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		102

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1	Amplification des signaux des capteurs en fonction de la distance capteur-paroi du transformateur.....	12
Tableau 1.2	Classement du bruit ambiant selon différentes plages de fréquences.....	17
Tableau 4.1	Classement des sensibilités de réception Wi-Fi chez D-Link.....	72
Tableau 4.3	Classement des résultats	73

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Bruit couronne des lignes hautes tensions (735 kV).....6
Figure 1.2	Comparaison du bruit EM à 75MHz : VCNP – Mesures pratiques.....8
Figure 1.3	Spectre de décharges partielles dans l’air.11
Figure 1.4	Montage de base pour la mesure de décharge partielle.11
Figure 1.5	Tension de la décharge à 35 cm du joint du transformateur.12
Figure 1.6	Circuit test équivalent pour la mesure d’une décharge partielle.13
Figure 1.7	Dispositif de mesure du bruit des décharges partielles de l'isolateur de traverse.14
Figure 1.8	Bruit couronne sous la pluie, 650 kV.....20
Figure 1.9	Influence du temps sur la propagation de décharges partielles.....21
Figure 1.10	Technologie sans fil et coûts.....24
Figure 1.11	Réseau capteurs Bluetooth pour les transformateurs de courant.27
Figure 1.12	Réseau de capteurs sur les bateaux-cargos.28
Figure 1.13	Postes et sécurité.29
Figure 2.1	Schéma du dispositif de mesure.....31
Figure 2.2	Courant de décharge et onde électromagnétique.34
Figure 2.3	Schéma du spécimen électro-tronqué (câble coaxial dégainé).34
Figure 2.4	Spécimen point-plan.36
Figure 2.5	Capture et traitement MATLAB d'une décharge théorique.....41
Figure 2.6	FastFrame temporel sur 10 captures.42
Figure 2.7	Spectre de l'enregistrement FastFrame.42

Figure 3.1	Spécimen électro-tronqué.	45
Figure 3.2	Antenne biconique 30-300 MHz.....	45
Figure 3.3	Bruit ambiant du CTT.....	46
Figure 3.4	Dispositif de mesure pour le spécimen électro-tronqué.....	47
Figure 3.5	Décharge partielle sous 10 kV.	48
Figure 3.6	Évolution de l'amplitude des ondes en fonction du voltage d'alimentation du spécimen.....	49
Figure 3.7	Spécimen point-plan.	49
Figure 3.8	Forme d'onde et spectre du spécimen point-plan à 7 kV et pour un espacement de 3 cm.	50
Figure 3.9	Spectre du spécimen point-plan sans le bruit FM.	51
Figure 3.10	Spécimen Tesla-coil.....	51
Figure 3.11	Bruit sans arc électrique.....	52
Figure 3.12	Bruit avec arc électrique.	53
Figure 3.13	100 impulsions FastFrame avec antenne Wi-Fi 2.4 GHz.	54
Figure 3.14	Capture de lecture FastFrame à l'oscilloscope.	55
Figure 3.15	Capture de 1 ms de décharges.....	56
Figure 3.16	Montage mesure autour de 2.4 GHz.	58
Figure 3.17	Bruit Tesla-coil mesuré avec une antenne Wi-Fi 2.4 GHz.	59
Figure 3.18	Décharge partielle pendant un arc électrique.....	60
Figure 3.19	Spectre Wi-Fi.	62
Figure 3.20	Montage émetteur Tesla-coil avec différents espacements.	63
Figure 3.21	Spectre pour un espacement de 10 mm.....	64
Figure 3.22	Spectre pour espacement de 2.5 mm.....	64
Figure 4.1	Superposition des spectres du bruit électro-tronqué pour différentes tensions d'alimentation.....	67

Figure 4.2	Superposition des spectres du tesla-coil pour un espacement allant de 7.5 mm à 1 mm.....	69
Figure 4.3	Influence de l'espacement sur la fréquence moyenne.	70
Figure 4.4	Influence de l'espacement sur la surface d'électrode.....	71
Figure 4.5	Dispositif de test de performance.	74
Figure 4.6	Résultats du test de performances, protocole UDP, 1 minute de durée de simulation.	76
Figure 4.7	Débit à la réception avec le protocole TCP.	76
Figure 4.8	Taille des trames reçues avec le protocole TCP.	77
Figure 4.9	Parafoudre (gauche) et isolateur de traverse (droite).....	83
Figure 4.10	Montages de test de performance avec deux ordinateurs portables.....	84
Figure 4.11	Capture de l'interface D-ITG.	85
Figure 4.12	Test de performance en milieu hautes-tensions.	86

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

RF	Radio Frequency
SNR	Signal to Noise Ratio
CTT	Centre Thermique et Technologique
VCNP	Very high frequency corona noise prediction
EM	Électromagnétique
R	Résistance
L	Inductance
C	Capacité
H	Champ magnétique
E	Champ électrique
FM	Frequency Modulation
AM	Amplitude Modulation
WEP	Wired Equivalent Privacy
WPA	Wi-Fi Protected Access
W-LAN	Wireless Local Area Network
EMI	Electromagnetic Interference
EMC	Electromagnetic Compatibility
FFT	Fast Fourier Transform
VPN	Virtual Private network
SSL	Secure Socket Layer
PES	Power and Energy Society
PSCC	Power System Communications Committee

UV	Ultra-Violet
RMS	Root Mean Square
IREQ	Institut de recherche d'Hydro-Québec
HV	Haut/High Voltage
DC	Direct Current
LNA	Low Noise Amplifier
GSM	Global System for Mobile communications
UDP	User Datagram Protocol
TCP	Transmission Control Protocol

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

dB	Décibel
dBm	Décibel par rapport à 1 mW
dB μ V/m	Unité de mesure du champ électromagnétique
V	Volt
kV	kilo Volt
MHz	10 ⁶ Hertz
GHz	10 ⁹ Hertz
Mb/s	10 ⁶ bits par seconde
Ω	Ohm
GS/s	Giga échantillon par seconde
μ s	micro seconde

INTRODUCTION

Dans un souci d'économiser l'énergie véhiculée vers les consommateurs, des fournisseurs comme Hydro-Québec veulent utiliser un réseau électrique intelligent «smart grid », afin de connaître le besoin énergétique de chaque équipement chez le client et de contrôler ainsi l'énergie en amont. Pour gérer les flux électriques en fonction de la demande des utilisateurs, les postes de transport d'énergie doivent être informatisés, ce qui nécessite l'adaptation d'un réseau de capteurs sur les équipements opérationnels. Grâce à ces capteurs, le personnel technique pourra contrôler les données des équipements et interagir avec le poste sans avoir à pénétrer dans son périmètre.

Au départ, les postes en cours d'utilisation n'ont pas été construites pour permettre un tel réseau, et il apparaît donc inapproprié d'entreprendre la mise en place d'un réseau filaire ou optique, sachant que ces postes ont une surface de 1 km^2 en moyenne et que les coûts d'installation, d'entretien et de configuration seraient trop importants. Un réseau sans fil semble être la solution idéale pour relier ces capteurs, car ils ont juste besoin d'être disposés à proximité des équipements à contrôler, sans ajouter des installations supplémentaires. De plus, grâce à la commercialisation de la technologie sans fil au grand public, comme le Wi-Fi, le Bluetooth, le Wimax ou le ZigBee, les prix ont grandement diminué, ce qui en fait un candidat sérieux pour assurer les communications sur ces postes.

Toutefois, il pourrait y avoir un problème : l'environnement où ces capteurs sans fil doivent être installés est le siège d'interférences et de bruits électromagnétiques dus au fonctionnement des équipements et aux hautes tensions véhiculées. Il est fort probable qu'il ne soit pas propice à une bonne communication, du moins si le fonctionnement des postes diminue le rapport signal sur bruit (SNR) autour des fréquences de communication.

Il est donc nécessaire de faire une étude sur le bruit RF présent dans ces postes, d'entreprendre des mesures, et de tester une communication sans fil dans un environnement similaire.

Depuis les années 60 et jusqu'à aujourd'hui, des études ont été menées pour caractériser ces bruits en s'appuyant sur des mesures faites sur les sites et sous diverses conditions météorologiques. Les interférences recensées sont dues soit au fonctionnement permanent du poste, comme le transport de hautes tensions par les lignes, les isolateurs de traverse («bushing» ou protections aux extrémités des câbles) ou le fonctionnement des transformateurs, soit au fonctionnement impulsionnel de certains équipements notamment durant les opérations de commutation ou de manœuvre de sectionneurs. Des mesures ont également été entreprises en laboratoire et des modèles analytiques ont été proposés afin de mieux cerner la nature de ces interférences et de prévoir leur étendue dans les cas où la prise de mesures s'avère difficile, voire impossible. Il apparaît que certains phénomènes physiques sont plus propices à la propagation d'ondes électromagnétiques dans l'air, que ce soit à proximité des équipements ou à plusieurs dizaines de mètres : c'est le cas de l'effet couronne, des décharges partielles, du «gap noise», des arcs électriques et des courants de coupure.

Ce mémoire vise, dans un premier temps, à caractériser le bruit électromagnétique présent dans les postes de transport d'énergie afin de recenser les paramètres des ondes générées, c'est-à-dire les fréquences, les amplitudes, la durée et le taux de répétition du bruit. Au premier chapitre, un premier classement est effectué dans la revue de littérature pour un bruit couvrant une bande de 1 MHz à 10 GHz selon les équipements en fonctionnement sur ces postes, leur tension d'alimentation, allant de 25 à 800 kV, et les conditions météorologiques. Ce chapitre revoit, d'un point de vue théorique et pratique, les principaux bruits abordés dans les articles, les méthodes employées pour les mesurer, et il présente les communications sans fil qui pourraient convenir pour établir un réseau de capteurs. Ces technologies sont présentées avec leurs avantages et leurs inconvénients, ainsi qu'avec quelques exemples d'utilisation dans des milieux hautes-tensions.

Le chapitre 2 présente un plan de mesure de ce type de bruit, c'est-à-dire tout d'abord la façon de générer des interférences semblables à celles des postes de transport d'énergie, et plus précisément la façon de créer des décharges partielles. Dans un deuxième temps, il propose une méthodologie de mesure et d'analyse du bruit électromagnétique. Les mesures sont effectuées au laboratoire hautes tensions de l'ETS : le CTT (Centre Technologique et Thermique), et sont présentées dans le chapitre 3. La communication sans fil la plus utilisée pour les réseaux est le Wi-Fi ; il convient donc d'étudier dans ce chapitre le bruit électromagnétique autour de la fréquence 2.4 GHz, qui est aussi partagée par le ZigBee et le Bluetooth. La génération du bruit reste la même, par contre le montage de mesure est différent. Dans le chapitre 4, tous les résultats sont classés, traités et interprétés pour déterminer, si oui ou non, une communication sans fil peut être établie dans un tel environnement électromagnétique. Ce chapitre montre également dans quelles conditions un bruit peut avoir un impact en fonction des paramètres de sa génération : tension d'alimentation, dimensions physiques, nature des conducteurs et des isolants et durée de fonctionnement.

En conclusion, un test de performance entre deux ordinateurs reliés par une connexion Wi-Fi, dans un environnement bruité selon les montages des chapitres précédents, est présenté avec ses résultats. Les équipements utilisés pour générer le bruit n'ont pas dépassé 50 kV d'alimentation, ce qui est très peu par rapport aux postes de 700 kV. Il serait donc approprié de poursuivre la méthodologie de mesure dans un laboratoire délivrant au moins 100-200 kV de tension de sortie. Cette partie présente donc des spécimens de décharges partielles pouvant supporter une alimentation au dessus de 100 kV.

CHAPITRE 1

MILIEUX HAUTES TENSIONS ET COMMUNICATIONS SANS FIL

1.1 Introduction

Les communications dans les milieux de puissance sont une étape essentielle pour les entreprises voulant améliorer leur rendement de production et assurer le bon fonctionnement de leurs matériels. Le sans fil est devenu accessible à tous, ce qui a engendré une diminution des coûts d'installations, et facilité le maniement des équipements de transmission lors de leur disposition sur de grandes surfaces. Cependant le fonctionnement des postes provoque des interférences pour ces communications et il est essentiel de s'interroger sur la compatibilité des technologies sans fil avec cet environnement électromagnétique.

Les articles sélectionnés pour cette revue de littérature visent à connaître les paramètres caractérisant les bruits et leur étendue : amplitude, fréquence, portée. Ils présentent aussi les technologies sans fil pouvant être adaptées à un milieu soumis à de telles interférences. Ils traitent des divers équipements utilisés à l'intérieur des postes (transformateurs, sectionneurs, isolateurs, jeux de barres, lignes, etc.), expliquent les façons dont les mesures sont prises et analysent les résultats.

Cette revue caractérise le bruit électromagnétique ambiant des postes de transport d'énergie sur une gamme de fréquence de 0.1 MHz à 10 GHz en confrontant les articles sélectionnés, en associant à chaque fréquence la puissance en dBm en fonction de la distance séparant la source du point de mesure, et si possible, sous différentes conditions météorologiques. Pour uniformiser les résultats recueillis dans les articles, la puissance du bruit sera toujours notée en dBm. Après l'étude des postes de transport d'énergie, nous ferons le lien avec les technologies sans fil actuelles susceptibles d'être installées dans ces milieux. Nous allons donc présenter les supports de communication disponibles, rappeler leurs avantages et inconvénients par rapport à un déploiement filaire, et discuter de leurs applications dans des environnements similaires.

1.2 Le bruit des postes de transport d'énergie

Pour connaître l'étendue du bruit électromagnétique sur les postes, il faut prendre en compte les équipements présents. Tout d'abord, seront abordées les caractéristiques du bruit issu des lignes hautes tensions (bruit GAP et effet couronne), puis le bruit des décharges partielles provenant du fonctionnement des transformateurs et des isolateurs de traverse (bushing). Les émissions électromagnétiques provoquées par les courants de coupures des bus de transmissions feront **également** l'objet de l'étude, ainsi que le bruit électromagnétique ambiant des postes. Un regard est également posé sur l'influence des conditions météorologiques sur la propagation des différents bruits recensés.

1.2.1 Les lignes de transport : bruit gap et couronne

Les lignes de transport, par exemple, selon leur tension, émettent du bruit électromagnétique connu sous le nom de bruit par effet couronne (ou corona). Ce bruit est le principal problème des lignes très hautes tensions (345-1000 kV).

Selon les articles ^[7] ^[8] ^[10] ^[16], le bruit par effet couronne est détecté sur une large gamme de fréquences : 0.01 MHz à 1 GHz pour les lignes de voltage inférieur à 375 kV et même jusqu'à 10 GHz pour des tensions à 800 kV et plus (1000 kV).

Le bruit par effet couronne est principalement causé par des perturbations dues à la présence de gouttelettes d'eau ou d'insectes sur les conducteurs. Ces perturbations provoquent à l'échelle locale une augmentation du champ électrique provoquant ainsi un court-circuit électrique de molécules d'air à la zone voisine. Le bruit GAP est généré au niveau des poteaux ou des tours portant les lignes : un courant traverse l'air pour aller de la ligne vers la structure métallique provoquant ainsi une décharge partielle.

Pakala ^[8] ^[10] a effectué des mesures à proximité des lignes hautes tensions afin de caractériser les bruits GAP et couronne sur une gamme de fréquence de 1 GHz dans un premier temps, puis jusqu'à 10 GHz.

Pour ces deux types de bruit, les mesures prises montrent que la puissance de ce bruit diminue quand sa fréquence augmente.

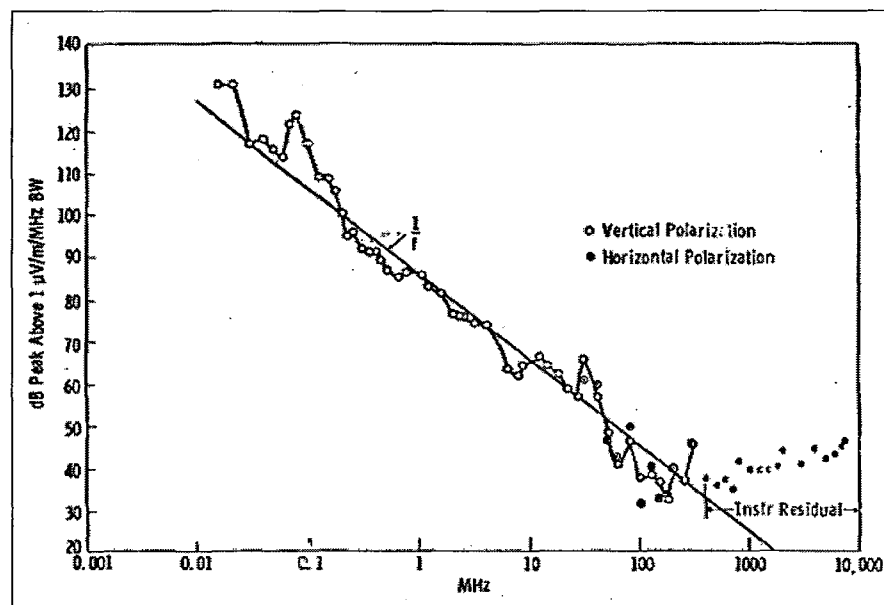


Figure 1.1 Bruit couronne des lignes hautes tensions (735 kV).
Tirée de W.E Pakala, 1971 ^[10]

Les études menées pour caractériser ce bruit ont nécessité des mesures faites en laboratoire pour avoir un aperçu du spectre sans le bruit parasite des autres équipements présents sur les sites, et pour étudier également l'impact météorologique sur la propagation de ces ondes.

L'article ^[10] de Pakala pousse les mesures du bruit Couronne pour un plus haut voltage : 640 – 800 kV. Les mesures prises sur le site ont été faites à l'aide d'antennes placées à 60m des lignes hautes tensions, mais il s'avère que la précision de ces mesures n'est pas très bonne au-delà de 1 GHz : le bruit à l'antenne est compris entre -76 dBm (1 GHz) et -116 dBm (10 GHz), alors qu'il varie de 41.8 dBm (0.1 MHz) à -76 dBm (1 GHz). Les lignes haute tension

ne sont pas soumises qu'à l'effet couronne : pour une tension en dessous de 75 kV, le bruit GAP semble avoir beaucoup plus d'influence, et son amplitude est beaucoup plus élevée vers les très hautes fréquences, que le bruit par effet couronne.

Les travaux de Pakala, en ce qui concerne le bruit GAP ou le bruit dû à l'effet couronne, ont été menés suivant un protocole de mesure méticuleux : mesures en laboratoire avec une sonde génératrice de décharges, puis mesures sur le site avec cette même sonde afin de simuler les décharges et enfin mesures sur le site avec les décharges naturelles.

La sonde génératrice est composée de deux électrodes : l'une connectée à la ligne et l'autre à l'air libre. Les deux électrodes sont sous une gaine de micarta (forme commercialisée de la bakélite : plastique fait de polymères synthétiques). La sonde se place sur un câble à l'aide d'une pince et l'autre extrémité, faite d'une demi-sphère cuivrée, est suspendue à l'air libre (le schéma de la sonde figure sur l'annexe I).

En laboratoire, les chercheurs ont analysé le bruit émis par cette sonde génératrice de bruit GAP en l'appliquant à un montage électrique ; il en résulte que de 0.01 MHz à 100 MHz, le bruit possède une amplitude de 30 dBm en moyenne. Les mesures ont demandé l'utilisation de plusieurs antennes adaptées aux gammes de fréquences : 0.01-0.3 MHz, 0.3-30 MHz, 30-400 MHz, 400-1000 MHz. En laboratoire, la distance normale entre l'antenne et le conducteur est de 15m.

Cette sonde a ensuite été placée sur une ligne haute tension (244 kV) d'un site de transport d'énergie et à différents endroits de la ligne (début, milieu, fin). Les spectres montrent qu'à partir de 1 MHz, le bruit descend en dessous de 23 dBm.

Sur les sites, pour prendre les mesures de fréquences, que ce soit pour le bruit gap ou le bruit dû à l'effet couronne, un camion est utilisé pour transporter les récepteurs (oscilloscopes, PC, analyseurs de spectres) avec l'antenne fixée sur le toit, mettant ainsi le dipôle de celle-ci à 6 m du sol. Les mesures de champs ont été effectuées tous les 30 m environ ^[8]. Cette méthode

de mesure a également été utilisée pour les enregistrements de bruits électromagnétiques des postes de transport d'énergie ^[12].

En plus des mesures, un programme a été conçu pour prédire les radiations dues à l'effet couronne pour les lignes très hautes tensions. Il s'agit du programme **VCNP** (« VHF corona noise prediction ») ^[7]. Il consiste à mettre à jour un modèle analytique déjà existant permettant de prédire les champs électromagnétiques générés par les lignes hautes tensions, qu'ils soient dus au bruit GAP ou couronne. Le modèle est valide sur une gamme allant de 30 à 1000 MHz, et il tient compte du conducteur des lignes, des caractéristiques de l'antenne ainsi que de sa disposition. Ce programme étant purement analytique, des mesures sur site ont été faites à la fréquence de 75 MHz afin de vérifier sa précision.

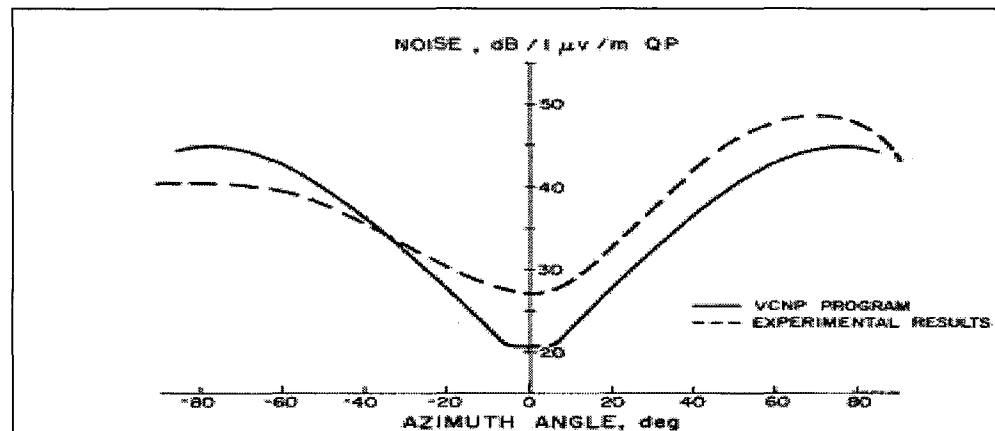


Figure 1.2 Comparaison du bruit EM à 75MHz : VCNP – Mesures pratiques.

Tirée de R.G Olsen, 1988 ^[7]

Que ce soit de façon expérimentale ou en simulation, il s'avère que le bruit est minimum juste en dessous des lignes (0°), et maximum à un angle de 70°. La disposition de l'antenne par rapport aux lignes joue donc un rôle important pour la mesure des interférences dues à l'effet couronne.

Les sources corona sont modélisées par des dipôles électriques qui sont répartis de façon aléatoire sur le conducteur et conduits par les courants impulsifs. Ces dipôles sont orientés de

façon perpendiculaire à la surface du conducteur. La première étape consiste à dériver le courant induit par un seul dipôle, ensuite de calculer le champ issu de ce courant (on pourra alors négliger le champ direct du dipôle). La réponse du système (antenne + récepteur) est calculée en fonction des champs. Le bruit total s'obtient par la somme de celui de tous les dipôles. La formule finale est empirique et peut être utilisée pour calculer le bruit corona ou GAP.

Si l'on passe les calculs effectués dans l'article, la formule du champ électrique du bruit corona pour les lignes Haut Voltage est :

$$E_{eq} = 20 \log\left(\frac{75}{f}\right) + 120 \log\left(\frac{E}{16.3}\right) + 40 \log\left(\frac{D}{30.4}\right) + \frac{q}{300} + W(x) \quad [\text{dB/1pV/m}] \quad (1.1)$$

Avec :

f : fréquence du bruit en MHz

E : gradient de surface maximum du conducteur en kV/m

D : diamètre du conducteur en mm

q : altitude de la ligne par rapport au sol en m

W(X) : Ajout du programme VCNP. Il s'agit du voltage en dB du bruit équivalent perçu au récepteur.

X : Distance latérale par rapport au récepteur en mètres

Comparaison effet couronne - Gap

Ces deux types de bruits coexistent sur les lignes hautes tensions, mais sur certaines gammes de fréquences, l'un prédomine sur l'autre selon la tension de la ligne ou les conditions météorologiques. Ces deux types de bruits n'ont pas la même bande de bruit : le bruit corona est détectable avec précision sur une bande allant jusqu'à 1 GHz, alors que la bande du bruit GAP est détectable jusqu'à 8 GHz. Si l'on considère un faible voltage, en dessous de 30 MHz, le bruit couronne est dominant par rapport au bruit Gap, et au dessus de 30 MHz, c'est

l'inverse. Mais par mauvais temps, la pluie peut réduire les sources GAP et augmenter l'effet de Couronne en haute fréquence.

Cet effet est encore plus marquant lorsque la ligne est en très haute tension (supérieure à 375 kV), comme il a été noté dans les études de Pakala ^{[8] [10]}.

1.2.2 Transformateurs et isolateurs de traverse : décharges partielles

Sous l'effet d'une haute tension, l'isolant entre deux conducteurs peut s'avérer inefficace pour un laps de temps très court. La dégradation du diélectrique ou un défaut d'un des conducteurs peut être la cause des décharges. Si l'isolant se trouve être troué (dans le cas d'un solide), ou si un bout de conducteur dépasse et vient se rapprocher d'un conducteur voisin, il se produit le phénomène de décharge partielle.

Il existe différents types de décharges partielles que l'on retrouve sur divers équipements haute tension : la décharge de corona (diélectrique = air), la décharge de surface, la décharge dans les transformateurs, ...etc. Les transformateurs, qu'ils utilisent de l'huile ou un gaz en tant qu'isolant, comme le reste des équipements, émettent des radiations causées par des décharges partielles ^{[13] [14] [15]}. On recense deux types de décharges : les décharges internes et externes. D'ordinaire, les radiations émises par les décharges internes n'ont pas d'influence sur le bruit ambiant, car le blindage des transformateurs les contient.

En ce qui concerne les articles ^{[13] [14] [15]}, les mesures ont été faites entre 2 m et 10 m de distance des sources. Les spectres de la figure 1.3 montrent bien la localisation des interférences en basses fréquences.

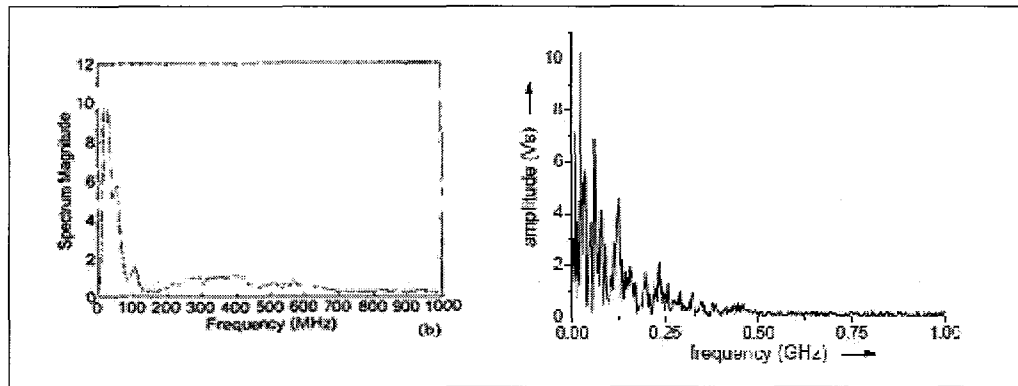


Figure 1.3 Spectre de décharges partielles dans l'air.

Tirées de P.J Moore, 2003 ^[13], et S. Tenbohlen, 2008 ^[14]

Le blindage des transformateurs empêche certes les décharges partielles internes d'émettre du bruit électromagnétique à l'extérieur de la carcasse ^[14], mais une faiblesse est à noter au niveau des joints ^[15]. Des mesures du bruit ont été prises à 30, 60, et 100 cm de ces joints. Même si les résultats ont été mesurés dans le domaine temporel, la gamme de fréquence de ce bruit reste de 0.5 à 1.5 GHz, avec une amplitude de 8 V pour 30 cm, 6 V pour 60 cm et 4 V pour 100 cm de distance par rapport aux joints.

Lors d'un test sur un transformateur ($V=100\text{kV}$), les auteurs mesurent les signaux Ultra haute fréquence (Ultra High Frequency) à l'extérieur et à l'intérieur du transformateur en utilisant des capteurs en contact avec la paroi du transformateur et reliés directement à un oscilloscope TEK TDS680B.

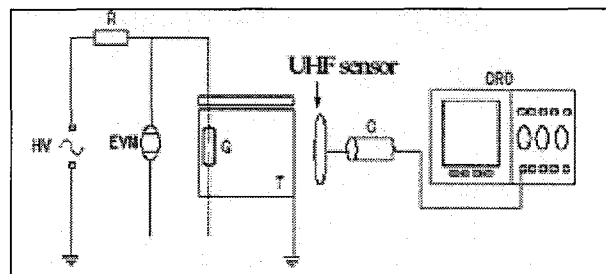


Figure 1.4 Montage de base pour la mesure de décharge partielle.

Tirée de LI Jun-hao, 2008 ^[15]

Les résultats des mesures ^[15] sont affichées dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 Amplification des signaux des capteurs en fonction de la distance capteur-paroi du transformateur

Tension max [V]	8 V	6V	4 V
Distance capteur - paroi [cm]	35 cm	60 cm	100 cm

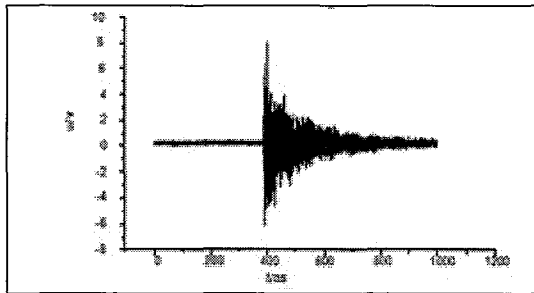


Figure 1.5 Tension de la décharge à 35 cm du joint du transformateur.
Tirée de Li Jun-hao, 2008 ^[15]

On observe les ondes issues de ces décharges sous forme d'impulsions oscillantes et amorties. Cette forme d'onde s'explique par le circuit de mesure de la décharge : le spécimen peut être caractérisé par un circuit RC, le reste du circuit est composé d'un montage RLC représentant la capacité de couplage (C_k , L_k), les fils (inductance L), et la source.

Les oscillations sont dues aux bobines représentant les fils et la capacité de couplage et l'amortissement est dû aux capacités et à la résistance de mesure (RC). Le schéma caractéristique du circuit de mesure est dépeint à la figure 1.6.

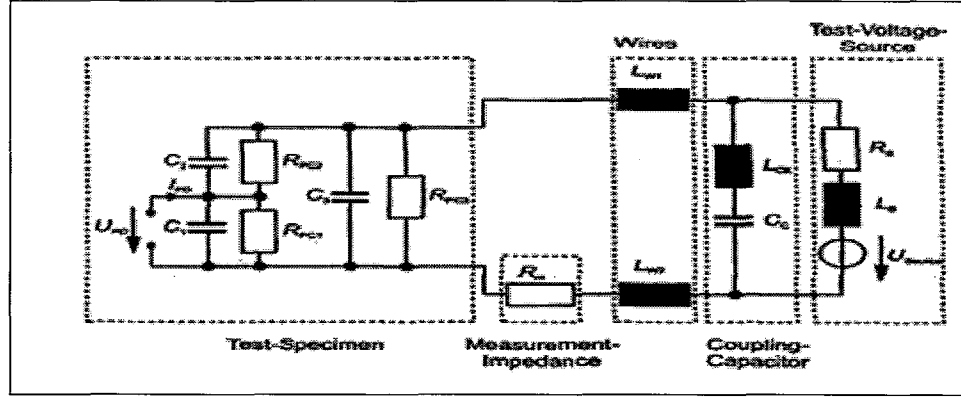


Figure 1.6 Circuit test équivalent pour la mesure d'une décharge partielle.
Tirée de M. Paede, 2002 ^[18]

Néanmoins, ce circuit peut être simplifié si l'on considère que les capacités C1 et C2 sont très petites devant C3, ce qui revient à considérer le spécimen comme la capacité C3. On peut

donc extraire la capacité effective $C = \frac{C_3 \cdot C_K}{C_3 + C_K}$, et l'inductance totale $L = L_w + L_{CK}$.

Ainsi la fréquence de résonance vaut $f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$

Et la fréquence de coupure haute vaut $f_c = \frac{1}{2\pi R_m C}$.

Si l'on fait abstraction de ces oscillations, l'impulsion électrique d'une décharge partielle se

représente sous la forme d'une impulsion gaussienne : $I(t) = I_0 \times \exp\left(\frac{-(t-t_0)^2}{2\sigma^2}\right)$,

avec I_0 l'amplitude du courant, t_0 le temps initial, et σ est un paramètre caractéristique de la décharge ($q = \sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot I_0$, avec q la charge équivalente).

L'onde produite par cette décharge est proportionnelle à la dérivée de ce courant. La formule du champ électromagnétique de la décharge partielle peut donc s'écrire sous la forme :

$$E(t,r) = \frac{\mu_0 l}{4\pi r} \times (-2(t-t_0)I_0 \exp\left(\frac{-(t-t_0)^2}{2\sigma^2}\right)) \quad (1.2)$$

Avec l la longueur de l'antenne, r la distance entre la source et l'antenne, et μ_0 la perméabilité magnétique dans le vide. Pour tenir compte des oscillations du circuit de mesure, il suffit d'ajouter un terme cosinus en facteur avec le courant, et de dériver ce produit pour avoir la formule du champ électrique émanant de la source. En termes d'équipements présents sur les sites, sont à considérer les protections d'entête de lignes : l'isolateur de traverse (Bushing).

D'après l'article ^[6], la gamme de fréquence de ce bruit, dû aux décharges partielles, se situerait entre 0.01 et 300 MHz, tel que le montre la figure 1.7, et ce à 2 m de la source. La difficulté de cette mesure vient du fait que le bruit se propage dans l'air, et qu'il est mélangé avec le bruit ambiant du poste.

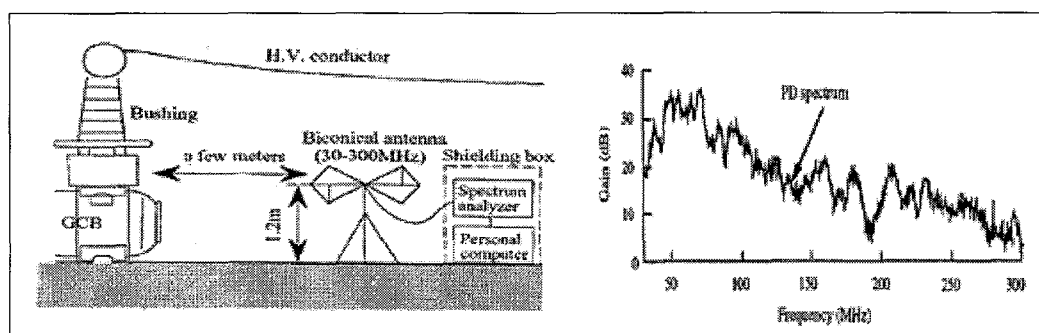


Figure 1.7 Dispositif de mesure du bruit des décharges partielles de l'isolateur de traverse.

Tirée de M. Hikita, 1998 ^[6]

Les mesures ont été effectuées sur 3 postes différentes : 550 kV en plein air, 550 kV GIS (Gas Insulated Poste), et 275 kV sous terre. Les méthodes de mesures sont les mêmes pour les 3 types de postes : une antenne biconique, de sensibilité 30 – 300 MHz, est placée à quelques mètres de l'isolateur ou bushing. Le signal est ensuite mesuré par un analyseur de spectre, lequel est relié à un PC. Au même moment, la pression de l'air, l'humidité et la température sont mesurées. On observe donc des spectres de bruits dans la gamme 30-300 MHz pour les postes en plein air OAIS (Open Air Insulated Subposte), pour les postes GIS (Gas Insulated Subposte) le bruit n'est présent que dans la gamme 50-70 MHz, et on

n'observe pratiquement rien pour le poste souterraine, car les équipements sont enfermés dans des réservoirs métalliques. Les 3 spectres sont donnés à l'annexe II.

Les tensions et courants de coupures générés pendant les actions de commutation émettent des radiations électromagnétiques. L'article ^[4] utilise la méthode **FDTD** (Finite-Difference Time-Domain) pour définir les champs H , E_r et E_z et des mesures sur le site viennent appuyer ce modèle en régime permanent et pendant les opérations de commutation, ce qui permet entre autres de mettre en équation le blindage des « bushings » et de voir ainsi jusqu'à quelle fréquence il est efficace. Il s'avère en fait que l'atténuation du blindage de l'isolateur de traverse est quasi nulle à partir de 55 MHz pour H , 25 MHz pour E_z , 80 MHz pour E_r , et que lors de son utilisation l'isolateur ne dispose que d'une protection de 1 dB maximum.

Dans le cas des opérations de commutation, les calculs ont été faits à partir de FDTD, pour une distance de 2m de l'isolateur de traverse, lequel est supposé être sur un fin support métallique, et un mur métallique est installé à 4m de la zone de mesure pour simuler le reste du poste. Il semble que le champ radial est plus influent quand l'isolateur est installé plus haut (3-4m). On obtient pour résultats de mesures, que le bruit électromagnétique a une fréquence inférieure à 300 MHz, pour une distance de 2m des Bushings. ($H_{\max} = 65$ A/m, $Radial_{\max} = 7$ kV/m, $Axial_{\max} = 20$ kV/m).

1.2.3 Émission électromagnétique provenant des bus

Les jeux de barres (Bus bar) de 115 kV sont traversés par un courant, et lors de commutations, des radiations électromagnétiques sont également émises. Les études de Thomas et Wiggins ^[5] se focalisent sur des programmes caractérisant, en un premier temps, le courant traversant ces jeux de barres pendant les opérations de coupures (programme METAP), puis dans un deuxième temps, les radiations générées par ce courant lors de ces mêmes opérations de coupures (programme TRAFIC).

Voici un bref descriptif de ces deux programmes :

- **METAP** : calcule les propagations d'ondes dans les bus (courant de coupure) pendant une opération de commutation. Il est utilisé pour simuler les coupures de courants dans le bus, en prenant en compte l'environnement des bus (R, L, C, diodes, lignes de transmission, transformateurs, switches...). On représente les bus et bras de commutateurs par des sections de ligne de transmission sans pertes, tandis que les transformateurs sont modélisés par des composants passifs R, L, C.
- **TRAFIC** : prédit les champs EM à plusieurs points arbitraires de l'espace pendant les coupures quand le courant traverse les bus (émission radiale). Il nécessite donc la connaissance du courant apporté par le modèle METAP. L'avantage de cet algorithme par rapport aux mesures prises avec une antenne est qu'il peut calculer les champs proches de la source d'émission («near field»). En revanche la modélisation est temporelle, ce qui nécessite un calcul supplémentaire pour avoir le spectre du bruit.

Il est à noter que les radiations des jeux de barres sont fonctions du courant, et non de la tension comme dans les autres types de bruit. Dans ces deux programmes, les modèles sont comparés par la suite avec des mesures faites sur le terrain et il s'avère qu'ils sont fiables ^[5] : on détecte le bruit jusqu'à 100 MHz.

1.2.4 Bruit ambiant des postes

En ce qui concerne le bruit ambiant présent dans les postes, et si l'on considère les équipements nommés ci-dessus, d'après les mesures effectuées en 1995 par B.C Hydro (Powetech Labs Inc), SaskPower, le centre de recherche en CCHT du Manitoba, Ontario Hydro et l'IREQ ^[12], les postes ne voient pas de bruit supérieur à -60 dBm en moyenne pour une gamme de fréquence allant de 30 à 300 MHz pour un voltage de 500 Kv. Pour ces mesures, des capteurs sont placés à différents endroits d'une zone comprenant des lignes hautes tensions et quelques transformateurs, et à un temps donné, les valeurs sont

enregistrées pour faire une moyenne du bruit ambiant. Il est par ailleurs intéressant de mentionner que Carter, lors de mesures effectuées à le poste de Pontchartrain, Louisiane en 1984 ^[11], a observé des signaux AM d'une amplitude d'environ 14 dBm localisés autour de 1 MHz. Le bruit ambiant de cette poste a été mesuré lorsqu'elle est équipée pour 115 kV et pour 230 kV. Pour le bruit ambiant, on observe en fonction des gammes de fréquence sur le tableau 1.2.

Tableau 1.2 Classement du bruit ambiant selon différentes plages de fréquences

Bande fréquentielle	Observations
0,4 - 2 MHz	Le bruit du poste 230 kV est supérieure de 10 dB par rapport au bruit du poste 115 kV
2 - 10 MHz	Le bruit du poste 230kV diminue progressivement et rejoint le même niveau de bruit (-61 dBm) que le poste 115 kV
10 - 40 MHz	Le bruit du poste 250 kV diminue pour atteindre -98 dBm

Les changements d'équipements et de tension offrent une différence maximale de 30 dB entre les deux types de postes, mais pas de changements quant à la plage de fréquences (40 MHz).

Les techniques de mesures du bruit électromagnétique dans les postes en régime permanent de la norme IEEE 430-1986 ^[16] imposent différents types d'antennes à disposer suivant la gamme de fréquence. Par exemple pour la gamme 0.1-30 MHz, l'antenne doit être placée à une hauteur inférieure à 2m, et pour la gamme 30-1000 MHz, la hauteur doit être supérieure à 3m pour les lignes hautes tensions. En ce qui concerne le bruit ambiant d'une zone recouvrant un maximum d'équipements (lignes transformateurs, commutateurs ...etc.), les méthodes utilisées sont équivalentes. Pour respecter la norme IEEE ^[16], pour le bruit ambiant

comme pour les lignes hautes tensions, les équipements de mesures doivent être placés à 3m de grands objets métalliques comme les barrières, transformateurs, bus.

La méthode exige les règles suivantes, pour la gamme 0.1-30 MHz :

- Les mesures doivent être prises à une distance de 10m des bus alimentés et à 15m des barrières qui entourent le poste, si le bruit doit être mesuré à l'extérieur.
- Si possible, les mesures radiales doivent être prises le plus loin possible des barrières.
- Sur chaque zone, le niveau du bruit radio doit être mesuré à 0.5 MHz. Le spectre de fréquence doit être pris sur la zone qui donne la plus haute amplitude à 0.5 MHz.
- Un détecteur quasi-crête doit être utilisé
- Une antenne cadre est l'antenne de prédilection pour ces mesures. Elle doit être montée sur une base n'excédant pas 2m de hauteur et doit être orientée de façon à avoir le meilleur angle.

Pour la gamme 30-1000 MHz, la méthode est la suivante :

- Les mesures doivent être prises à une distance latérale de 10m des bus alimentés ou à l'extérieur du poste à une distance latérale de 15m du périmètre de la clôture entourant le poste.
- Pour chaque zone, les niveaux du bruit radio à 73.5 MHz et 150 MHz doivent être mesurés. Un spectre de fréquence doit être mesuré pour la zone offrant le plus haut niveau de bruit radio à 73.5 MHz.
- Un détecteur quasi-crête doit être utilisé.

- Un dipôle ou une antenne à large bande peut être utilisée. Elle doit être placée en position horizontale polarisée et orientée de façon à obtenir la meilleure précision. La position de l'antenne doit être retenue.

L'antenne doit être placée à au moins 3 m du sol sur un support. Si elle est montée sur le toit d'un véhicule, elle doit être à au moins 2 m du toit. Il s'avère qu'à cette hauteur l'antenne n'est pas influencée par l'équipement présent dans le véhicule ; cependant, la combinaison du véhicule et de l'antenne doit être calibrée pour confirmer les facteurs de l'antenne.

1.2.5 Effet du changement climatique sur le bruit

Les changements climatiques ont un effet sur l'amplitude du bruit : diminution de 5 à 10 dB par mauvais temps (pluie) ^[12]. Toutefois, les avis restent partagés quant à l'influence des conditions météorologiques sur le bruit électromagnétique : d'après les rapports de l'IREQ^[12], sur les 3 compagnies ayant effectué les mesures sur leurs postes, une seule retient une légère influence. Mais encore ici, il s'agit du fonctionnement permanent des équipements. Pakala ^[10] et Hikita ^[6] ont pris en compte l'influence du temps lors de décharges (effet couronne ou décharges partielles).

Pour les décharges de type couronne, Pakala a simulé une pluie à l'aide d'arroseurs sur les lignes hautes tensions (650 kV) afin d'observer son influence sur le bruit rayonné.

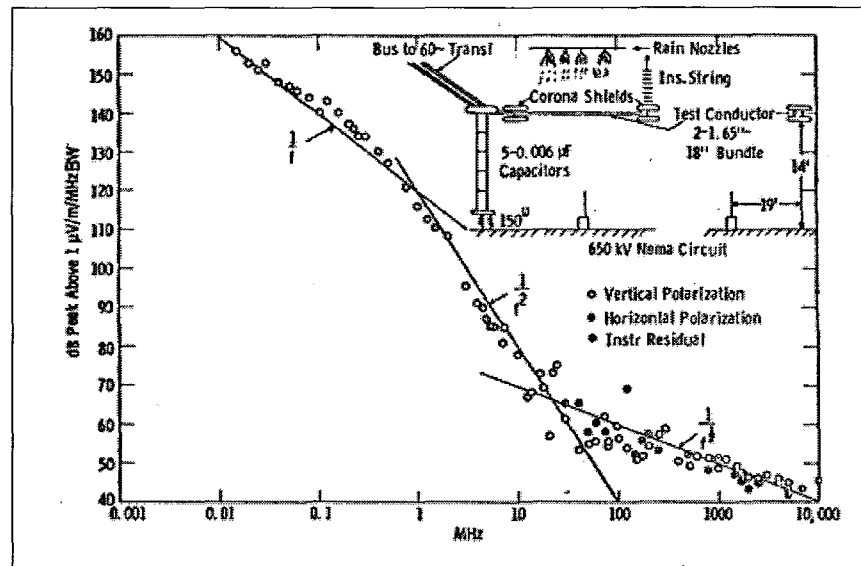


Figure 1.8 Bruit couronne sous la pluie, 650 kV.

Tirée de W.E Pakala, 1971 ^[10]

Il s'avère que sous forte pluie (0.3 pouces / heure), le niveau de bruit augmente de 17 dB, si l'on compare ce spectre à celui de la figure 1.1. Selon Hikita ^[6], la pluie qui tombe à la surface du conducteur favorise l'action des décharges partielles, d'où l'augmentation du gain du bruit par temps pluvieux.

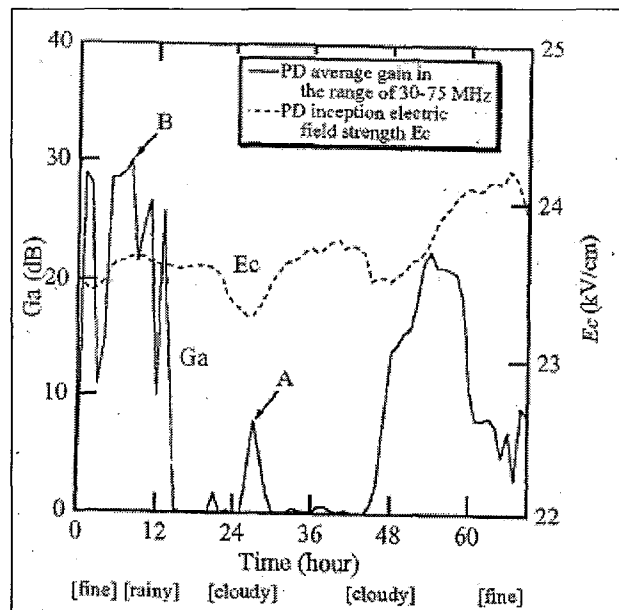


Figure 1.9 Influence du temps sur la propagation de décharges partielles.

Tirée de M. Hikita, 1998 ^[6]

À $T = 0$ heure, les conditions initiales sont prises pour un temps sec et pour un bruit nul. Le temps pluvieux provoque une augmentation de la puissance de bruit des décharges (Zone B de 0 à 12h), un temps nuageux offre des décharges moins présentes (zone A de 12h à 48h). On remarque que plus l'air est humide et plus la rigidité de diélectrique de l'air (E_c) diminue, ce qui provoque des conditions à la génération de décharges partielles plus propices.

1.2.6 Classement des résultats

Afin d'harmoniser tous les résultats trouvés, un tableau à l'annexe III répertorie les puissances des bruits émis sur le poste selon le voltage de l'équipement et la gamme de fréquence.

Sur ce tableau figure également les références des articles ainsi que la distance séparant la source de bruit et l'antenne qui a servi pour la mesure. Les bruits répertoriés n'ayant pas la même unité de mesure, ils ont été convertis en dBm et correspondent à ceux émis à la source

(lignes hautes tensions, transformateurs...etc.). Les résultats du tableau ont permis de tracer un graphe 3D afin de mieux observer la répartition du bruit dans le poste, mais les natures des bruits étant différentes, deux types graphes ont été tirés : un pour le bruit ambiant et un pour le bruit impulsionnel. Ces résultats figurent également aux annexes IV et V avec des vues 2D (fréquence vs bruit et tension vs bruit).

Le bruit recensé sur les postes transportant entre 25 et 800 kV, varie entre -50 et 20 dBm, mais entre 200 MHz et 10 GHz, ce bruit est inférieur à -10 dBm. Que ce soit pour le bruit impulsionnel ou ambiant, ce sont aux plus basses fréquences que l'on retrouve le niveau de bruit le plus fort.

1.3 La technologie sans fil

Les systèmes de communications fleurissent au sein des industries actuelles, et en particulier la technologie sans fil. Cette dernière offre plusieurs avantages : des installations peu coûteuses, un déploiement rapide, un accès facile et la mobilité. Les postes hautes-tensions présentent des difficultés pour les réseaux sans fil, notamment en ce qui concerne la fiabilité et la sécurité. Ces problèmes regroupent l'impact du bruit de l'environnement électrique des postes sur les communications, la fiabilité des équipements sans fil commerciaux disponibles, la surcharge de la bande passante (particulièrement pendant les situations d'urgence), et la sécurité de communication. Pour toutes ces raisons, le sans fil nécessite beaucoup d'analyses et de précautions avant d'être installé dans de telles postes. Néanmoins, ses avantages lui offrent le mérite d'être choisi parmi les autres supports de communications.

Dans l'éventuel projet d'installer un tel réseau, il faut déterminer où les capteurs doivent être placés, quand sont-ils préférables à des communications filaires et quels développements supplémentaires sont nécessaires à leur installation.

1.3.1 État de la technologie

Les systèmes sans fil ont été utilisés depuis des décennies pour les communications de données suivantes : systèmes micro-ondes, radio à étalement spectral, radio à adresses multiples. Cependant, de nouvelles technologies offrent des possibilités et des opportunités jamais rencontrées. Les communications RF personnelles et commerciales sont devenues accessibles à tous, ce qui a également baissé leurs coûts et de nouvelles normes sont en train d'être développées pour les séries 802.11, 802.15 et 802.16, afin de les rendre utiles pour certaines applications en milieu hautes-tensions. Actuellement, des développeurs commencent à concevoir des équipements de communication innovants pouvant détecter la présence de bruits sur une large bande de fréquences, et ainsi choisir la bande la moins surchargée pour effectuer la transmission ^[21].

Voici les technologies mises à disposition :

- IEEE 802.11 définit la norme pour les réseaux locaux sans fils (W-LAN), englobant trois technologies incompatibles : étalement de spectre à sauts de fréquence, étalement de spectre à séquence directe, et l'infrarouge.
- Wi-Fi – IEEE 802.11b : Actuellement le Wi-Fi est la norme standard la plus populaire. Il a pour avantage d'être bon marché par rapport aux autres normes. Il fonctionne en moyenne à 11 Mb/s et utilise la bande 2.4 GHz pour un rayonnement de 30 à 40 m environ.
- Wi-Fi renforcé – 802.11g : ce Wi-Fi est le même que précédemment, sauf que son débit est de 54 Mb/s.
- Wi-Fi sécuritaire – 802.11i : cette version améliore la norme 802.11 au niveau des mécanismes de sécurité. La norme standard remplace l'ancienne spécification de sécurité WEP (Wired Equivalent Privacy) par le WPA (Wi-Fi Protected Access) en tant que

solution intermédiaire. Wi-Fi Alliance fait plus référence au WPA2 pour le 802.11i en utilisant le chiffrement basé sur l'algorithme AES (Advanced Encryption Standard).

- Bluetooth – IEEE 802.15.1. Il est souvent utilisé dans les cellulaires et autres équipement sans fil mobiles, principalement pour des communications avec des ordinateurs, IED (Intelligent Electronic Devices), des kits main-libres...etc. Il fonctionne à la fréquence de 2.4 GHz, a une faible portée (10m) et un faible débit de 1.5 Mb/s. Il est donc classé parmi les réseaux faibles-trafics.
- ZigBee et les réseaux maillés : 802.15.4 est la norme des réseaux personnels sans fil à faible débit, aussi connus sous le nom de réseaux maillés, à l'opposé du point-à-point. ZigBee s'appuie sur la norme 802.15.4 pour définir des profils d'applications qui peuvent être partagés entre différents fabricants pour fournir une interopérabilité entre les systèmes.
- Wimax – IEEE 802.16 introduit la connexion d'accès large bande BWA (Broadband Wireless Access) sur très longue distance (10-40 Km) et pour un fort débit (100 Mb/s). Le but principal du Wimax est de fournir une solution alternative au câble, DSL, communications T1, et de distribuer des services Internet. Sa fréquence porteuse peut être comprise entre 2 et 10 GHz.

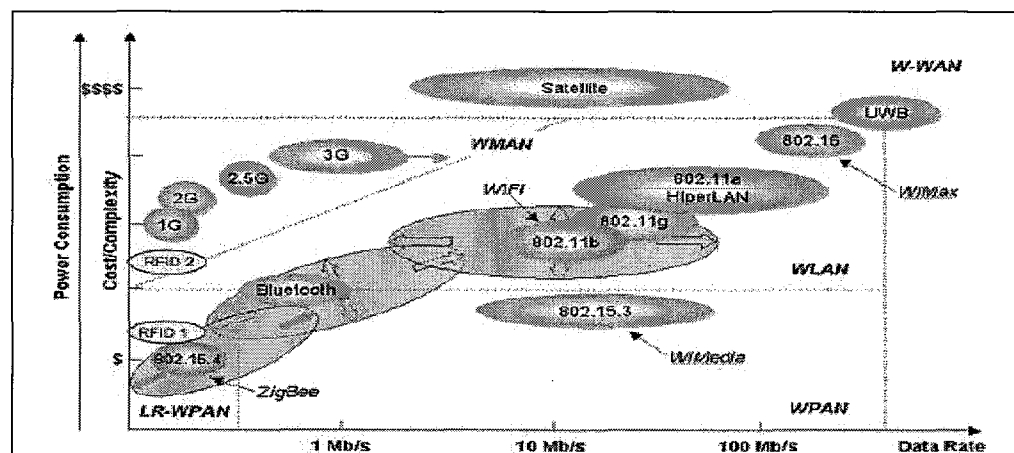


Figure 1.10 Technologie sans fil et coûts.

Tirée de F. Cleveland, 2006 [21]

Mettre en réseau des capteurs via le sans fil offre plusieurs avantages sur les réseaux classiques, surtout quand il s'agit de couvrir une surface dont la dimension est de l'ordre du km^2 . Là où il nécessiterait de tirer des km de câbles RJ45 ou de fibre optique à 25 k\$ le mile, il suffirait de disposer directement les capteurs sans fil aux endroits adéquats. L'installation est d'autant plus facile que les capteurs se mettent en réseaux par simple détection sans demander à un technicien de pénétrer dans la zone de communication pour faire les liaisons.

Dans l'éventualité où les utilisateurs peuvent être déplacés d'une place à une autre, le sans fil assure la mobilité. Il ne s'agit pas seulement de personnes ou de véhicules mais aussi de systèmes entiers qui peuvent être déplacés. Si le poste connaît dans sa durée de vie des modifications quant à l'emplacement de ses équipements, il suffit de déplacer les capteurs avec les entités qu'ils contrôlent.

Cependant, le sans fil ne présente pas que des avantages. L'écoute électronique sur les canaux non sécurisés est un problème récurrent des réseaux sans fil. Si « l'intrus » se trouve dans la zone d'émission, il aura accès aux signaux et si les données ne sont pas encryptées il pourra les comprendre. Cependant l'encryptage et les techniques à étalement spectral fournissent une couche supplémentaire de sécurité contre l'écoute.

Les interférences électromagnétiques constituent le problème majeur des communications en milieu hautes tensions. Pendant le fonctionnement des équipements et surtout pendant les opérations de court-circuit, les signaux peuvent être perturbés de façon continue ou momentanément. Les grandes distances entre émetteurs et récepteurs, les conditions météorologiques, les surfaces métalliques qui font de la réflexion et du multi-trajet affaiblissent le signal, mais peuvent aussi augmenter la diversité. Les utilisateurs voisins peuvent surcharger la bande passante de communication des postes, causant ainsi des délais et une nécessité de retransmettre les données. Cette surcharge peut aller jusqu'à augmenter le temps d'attente et réduire le débit du système sans fil, sans pour autant stopper la transmission. La conception du sans fil ne lui offre pas la même protection face aux interférences que pour les réseaux filaires, ni la même sécurité, de plus la majorité de cette

technologie a été conçue en direction du commerce de masse et non des postes hautes tensions. Cependant quelques équipements sans fil ont été entièrement testés ou adaptés pour ces environnements (voir partie suivante : 1.3.2).

Pour n'importe quel système, il est nécessaire de tester les performances du réseau sans fil là où les capteurs doivent être déployés. Pour plus de réalisme face à une simulation par logicielle, le fait de placer les équipements dans le champ électromagnétique des postes est la meilleure analyse à faire pour connaître les conditions de transmissions. En effet, trop de facteurs rentrent en jeu, par exemple les obstructions « line-of-sight », les interférences, les réflexions dues aux parois métalliques, les autres fréquences de communication utilisées par le voisinage... De plus, ces facteurs sont variables avec le temps. C'est aussi pourquoi des méthodologies de mesures sont cruciales pour déterminer l'environnement de transmission avant de choisir les supports de communication.

1.3.2 Rôle des systèmes sans fil dans les postes

L'adaptation d'un réseau sans fil à un milieu hautes-tensions doit être accomplie en considérant les différents facteurs qui peuvent perturber la transmission : fréquence surchargée, EMI, congestion... Il est possible qu'il faille modifier ces technologies afin de les adapter à ces environnements.

La technologie sans fil fonctionne par redondance de l'information, donc les données transmises peuvent tolérer des retards, ce qui implique aussi qu'elles peuvent être perdues pendant une certaine durée ou que le système peut les garder en mémoire, grâce à un buffer, le temps que la transmission reprenne.

L'industrie de gestion de puissance a longtemps utilisé les technologies sans fil pour ses opérations : les systèmes micro-onde, les radios à adresse multiple (MAS), les systèmes de radio à étalement spectral, les systèmes 450 MHz à courte portée, les applications satellite limitées (VSAT, paging, et GPS), les systèmes radio mobiles pour les échanges limités de

données. Cependant, ces applications ont été faites à l'extérieur des postes ou entre sites. Voici quelques exemples d'utilisation du sans fil dans des milieux semblables aux postes de transport d'énergie :

Les capteurs de transformateurs de courant pour une communication Bluetooth.

Des capteurs de courant précis peuvent être facilement déployés et permettent de suivre l'environnement des lignes hautes-tensions pendant leur fonctionnement.

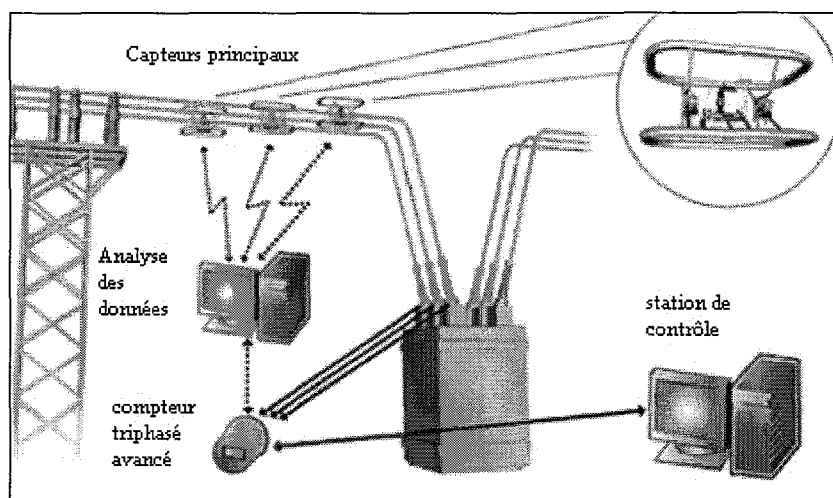


Figure 1.11 Réseau capteurs Bluetooth pour les transformateurs de courant.
Adaptée de F. Cleveland, 2006 ^[21]

Les capteurs principaux sont reliés par Bluetooth à un ordinateur du poste de travail dans le bâtiment voisin du poste de contrôle et lui envoient les flux de données. Le logiciel communique alors instantanément avec un compteur triphasé avancé, qui est connecté par fil au transformateur de courant en cours de test.

Crossbow Wireless Network4

BP a eu pour projet de faire un entretien des machines de ses bateaux. Les données de vibration renseignent sur l'état d'usure et informe si une maintenance est nécessaire ou non.

Il a fallu installer 150 accéléromètres Rockwell sur les machines à rotation. Ces senseurs sont reliés à un processeur de signal Intel qui effectue une FFT sur les signaux de vibration et convertit les résultats en données numériques. Les données sont ensuite véhiculées sur le réseau sans fil Crossbow.

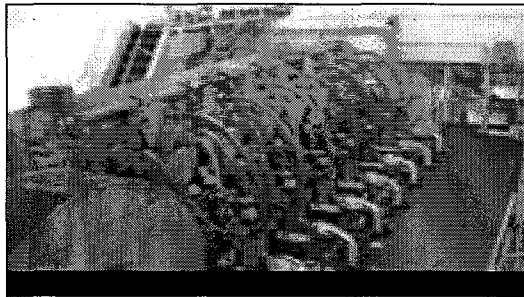


Figure 1.12 Réseau de capteurs sur les bateaux-cargos.
Tirée de F. Cleveland, 2006, [21]

Avec toute la structure métallique du bateau, les conditions de transmission radio sont vraiment mauvaises, c'est pourquoi le réseau sans fil utilise une configuration « maillée » ou « grappe » (« mesh » ou « cluster ») avec chaque nœud radio capable de communiquer avec les nœuds voisins. Les données sont donc transmises nœud-à-nœud sur un parcours sans obstacles jusqu'à atteindre la « passerelle principale » où elles sont transmises à l'intranet du bateau.

Les ordinateurs portables utilisés sur le terrain pour se connecter aux équipements

- Con Ed a 1000 ordinateurs portables capables de se connecter à la fois en CDMA et en 802.11g avec les équipements des postes. Le politique du sans fil de cette compagnie impose un cryptage quand le personnel utilise l'accès public comme VPN ou SSL. L'accès W-LAN est contrôlé par un logiciel de sécurité de Cisco. Les réseaux publics sont utilisés pour collecter les données, tandis que les privés sont destinés aux interactions avec l'équipement.
- Schweizer Engineering Laboratories (SEL) a développé le module de communication SEL-3022, qui peut utiliser le port série d'un PC pour se connecter en sans fil avec un

processeur de communication du poste. Le but premier est que le personnel puisse avoir accès aux données et interagir avec le poste dans la confidentialité, sans pour autant entrer physiquement dans le poste. Cette technologie utilise la norme 802.11b avec encryptage standard AES.

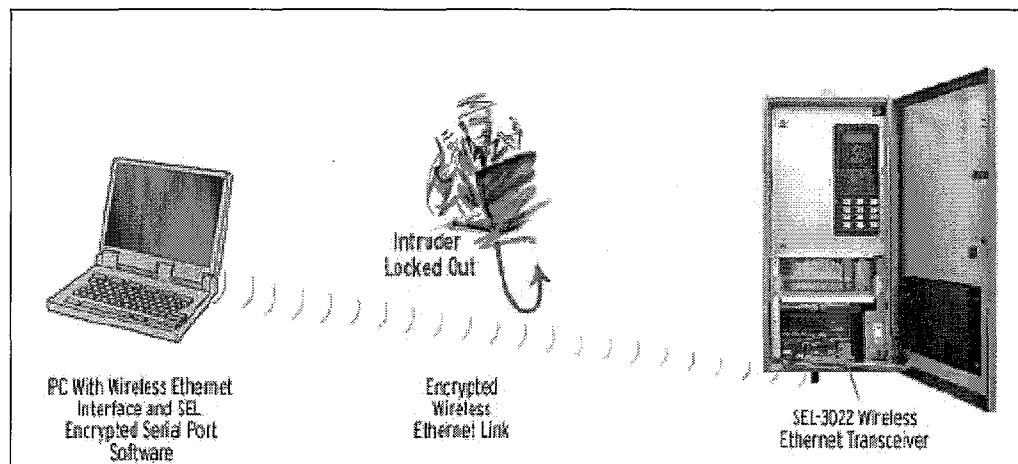


Figure 1.13 Postes et sécurité.
Tirée de F. Cleveland, 2006 ^[21]

1.4 Conclusion

En résumé, selon les diverses publications examinées dans la revue de littérature, le fonctionnement permanent d'une poste génère du bruit électromagnétique à haute fréquence (300 MHz maximum). Que ce soit une moyenne de bruit dans une zone de capteurs ou bien des mesures faites à quelques mètres d'équipements comme les lignes ou les transformateurs, ce sont surtout les événements impulsionnels qui sont à prendre en compte. L'effet couronne pour les lignes hautes tensions, ou bien les décharges partielles pour les transformateurs, ou les isolateurs de traverses sont les principales sources de bruits avec, entre autres, les opérations de coupures.

Néanmoins ces événements sont de très courte durée (de l'ordre de la centaine de ns). Que ce soit pour n'importe quel voltage, la puissance du bruit diminue quand la fréquence augmente,

on observe donc que les bruits (ambient et impulsionnel) sont plus présents sur une gamme inférieure à 300 MHz.

Pour le bruit à effet couronne, les méthodes et les équipements de mesures utilisés dans les articles de Pakala ^[8] ^[10] sont anciens (1970) et de ce fait, ils n'offrent pas une grande précision, surtout par rapport au bruit dépassant 1 GHz. Les données sont quelque peu parasitées par le bruit ambient du poste lors de mesures sur les sites, il est donc difficile de séparer l'effet couronne du reste de l'environnement électromagnétique. De plus, ce bruit a été mesuré avec un analyseur de spectre, or il s'agit d'un type de décharges partielles ; il conviendrait mieux de le mesurer temporellement comme l'a fait P.J Moore ^[13] et d'extraire par la suite le contenu spectral de l'onde, afin de dresser un bilan statistique quant aux fréquences et au taux de répétition de ces décharges.

Les essais en laboratoire permettent de mieux caractériser le bruit provenant d'un équipement particulier et définir ainsi sa nature : décharge partielle, effet GAP, couronne...etc. Cependant, les laboratoires influencent les mesures au niveau des ondes réfléchies par les murs, créant ainsi un multi-trajet qui n'existerait pas sur site.

Malgré les caractéristiques électromagnétiques des postes, des réseaux sans fil ont pu être adaptés pour des opérations précises. Il suffit de prendre connaissance des endroits les moins bruyés ou obstrués, et de choisir la technologie sans fil adéquate en fonction de la taille des données à transmettre et des exigences d'attente. Depuis 2007, un comité sur les communications sans fil (commandité par IEEE PES PSCC et les comités des postes d'énergie) planifie les modifications à apporter afin de permettre les transmissions dans les postes.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE DE MESURE

2.1 Présentation

Afin de préparer les mesures sur site, un dispositif de tests en laboratoire est nécessaire. Il s'agit d'organiser une méthode d'enregistrement des formes d'ondes électromagnétiques émanant des équipements afin d'expliquer leur comportement, leurs paramètres et de fournir par la suite le spectre fréquentiel correspondant. Connaissant la nature des bruits potentiels, les mesures en laboratoire se concentrent sur les décharges partielles suivantes : impulsion due à l'effet couronne, décharges internes, décharges de surface, représentant respectivement les bruits rencontrés sur les lignes hautes tensions, les transformateurs et les isolateurs de traverse (bushing).

Selon la revue de littérature, le dispositif de mesure est simple dans sa conception : une ou plusieurs antennes reliées à un oscilloscope, lequel exporte les échantillons vers un PC.

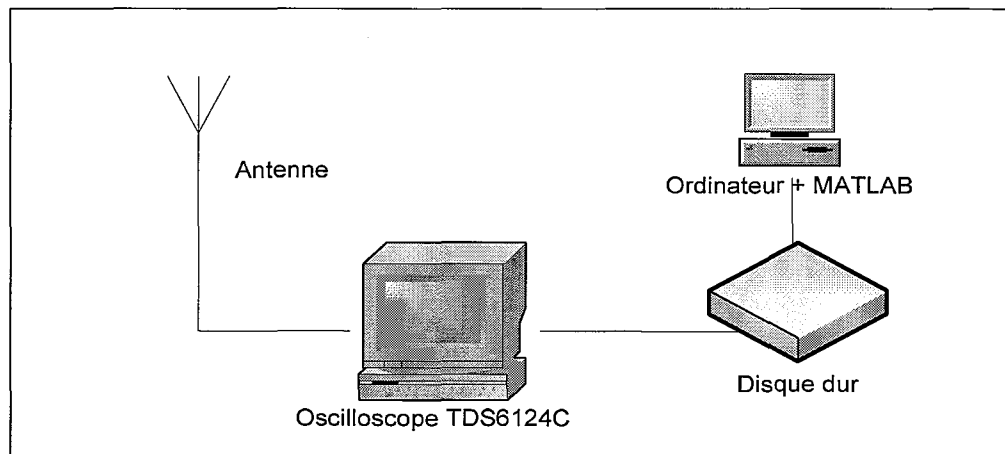


Figure 2.1 Schéma du dispositif de mesure.

Cependant, il faut trouver un moyen d'obtenir les enregistrements réalistes et précis et qui contiennent toute l'information utile d'une décharge. De plus, pour ne pas fausser les mesures, il est également important de s'assurer que l'équipement, hormis l'antenne, soit isolé du bruit électromagnétique ambiant. Les manipulations ont lieu dans le laboratoire d'énergie CTT (Centre Thermique et Technique) de l'ETS et se font à l'aide de spécimens reproduisant les décharges telles que produites sur des équipements hautes tensions. Grâce à la collaboration du département de génie mécanique responsable du CTT, les mesures ont porté sur deux spécimens : le modèle électro-tronqué et le point-plan.

Le défi de cette partie est donc d'organiser un système de mesure capable de détecter le bruit impulsionnel d'une durée de quelques nanosecondes, sans perdre d'informations, mais aussi d'enregistrer le bruit sur une grande fenêtre temporelle, afin de compter le nombre de décharges générées, pour évaluer un taux de répétition.

La difficulté vient donc de plusieurs facteurs :

- La rapidité de l'impulsion (10-300 ns)
- Le bruit électromagnétique ambiant et indépendant des décharges
- Le traitement des enregistrements

Il faut donc prévoir la rapidité d'enregistrement de l'oscilloscope afin de capturer entièrement les formes d'ondes des impulsions électromagnétiques et reconnaître les parties du signal appartenant au bruit de fond.

2.2 Décharges partielles et effet couronne

Une décharge partielle est un courant qui ne court-circuite que partiellement l'isolant entre deux conducteurs sous l'effet d'une très haute tension. On distingue deux types de décharges partielles : les décharges internes et externes. Une décharge interne a lieu au niveau de la dégradation du diélectrique entre deux conducteurs sous tension, tandis qu'une décharge externe a lieu à l'interface diélectrique-conducteur.

Une décharge partielle se produit entre deux conducteurs soumis à une haute tension (plusieurs kV) : l'un alimenté et l'autre relié à la masse. La tension appliquée génère un champ électrique qui se propage vers l'électrode-masse. Durant cette propagation, un électron libre de l'isolant (l'air dans le cas du bruit couronne) est mis en mouvement et heurte un ion de l'isolant. Sous le choc, l'électron libre vient prendre la place d'un électron de l'ion, lequel se détache, et est mis en mouvement et heurte, à son tour, un autre ion. Ce processus s'effectue ainsi de suite : on appelle ce phénomène une « avalanche d'électrons ». Le diélectrique s'ionise et un courant de décharge apparaît dès que le potentiel appliqué dépasse la rigidité diélectrique de l'isolant (36 kV/cm pour l'air sec). Plusieurs spécimens existent pour reproduire ce phénomène ; ils diffèrent par la forme géométriques de leur électrodes (aiguilles, sphères, plans,...), par la nature de l'isolant (air, huile, résine,...) et par le GAP (distance entre les électrodes) de celui-ci.

Le courant de décharge possède un temps de montée très rapide (quelques dizaines de ns) et un temps de descente beaucoup plus long (100-1000 ns), voir la formule ci-dessous [20].

Erreur ! Des objets ne peuvent pas être créés à partir des codes de champs de mise en forme. (2.1)

Avec T_1 le temps de montée des électrons, et T_2 le temps de chute des ions.

L'onde électromagnétique correspond à ce courant de décharge modulé à une ou plusieurs fréquences porteuses (figure 2.2). Le processus d'ionisation du diélectrique explique le temps

de montée et de descente du courant de décharge, mais une explication théorique justifiant la fréquence de l'onde électromagnétique est plus difficile.

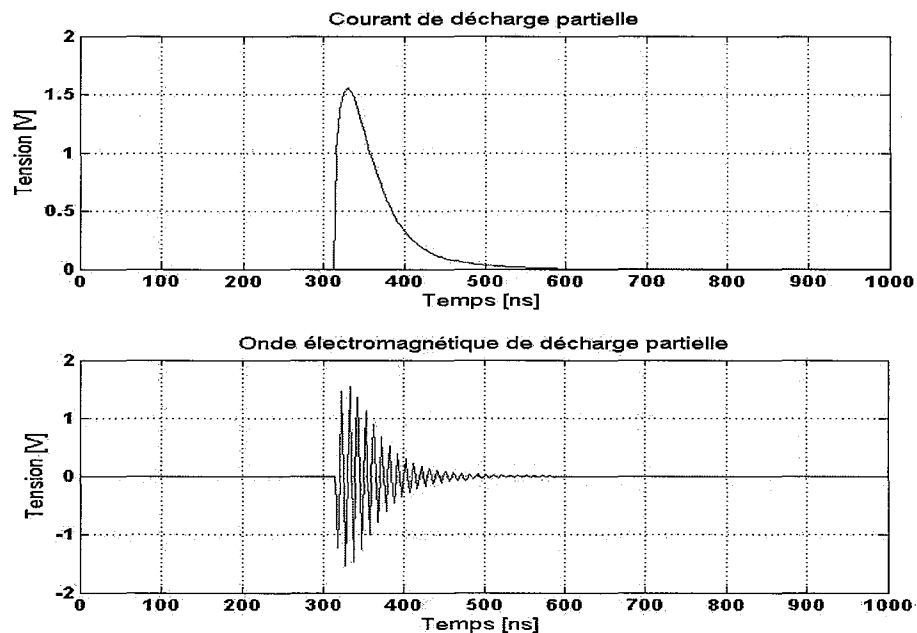


Figure 2.2 Courant de décharge et onde électromagnétique.

2.3 Le spécimen barre de générateur ou électro-tronqué

Le spécimen est essentiellement une barre de cuivre de forme rectangulaire entourée d'un isolant en époxy-micarta de la même forme, lequel est relié à la masse en son milieu, tel qu'illustré à la figure 2.3. Ce dispositif permet de reproduire l'effet d'une décharge externe dans l'air, appelée décharge couronne. Sur les sites de transport d'énergie, la décharge se produit en surface d'un isolateur de traverse ou à la sortie d'un transformateur.

Erreur ! Des objets ne peuvent pas être créés à partir des codes de champs de mise en forme.

Figure 2.3 Schéma du spécimen électro-tronqué (câble coaxial dégainé).

La décharge se situe au niveau de la séparation blindage-isolant (point A) sous forme d'étincelle UV. L'alimentation est celle de l'équipement, à savoir plusieurs centaines de kV selon la tension du site et à une fréquence de 60 Hz, en Amérique du nord notamment.

Explication du phénomène : l'extrémité du système blindé étant dégainée et l'isolant étant à nu, le potentiel au point B est quasiment le même qu'au point C. Le point A est relié à la terre, ce qui provoque un fort champ électromagnétique tangentiel le long de la surface de l'isolant. Lorsque ce champ dépasse 1 kV/mm, l'air s'ionise et il se produit une décharge par effet couronne. On peut considérer à présent le spécimen, alimenté sous un haut voltage à 60 Hz, comme étant un générateur d'impulsions électromagnétiques.

Ce spécimen est réputé pour être le plus constant en termes de génération de décharges partielles. En effet, on peut entendre un grésillement correspondant aux décharges et même apercevoir des arcs bleus autour du point A lorsque le spécimen se trouve dans une salle sombre.

2.4 Le spécimen point-plan

Ce modèle reproduit les décharges partielles internes et externes qui peuvent survenir dans un transformateur, créant ainsi du bruit au niveau des connexions avec l'équipement voisin.

Le spécimen est assez rudimentaire : il s'agit de maintenir une distance (gap) entre deux électrodes, l'une en forme aiguille, l'autre plane, et de les alimenter sous haute tension, comme sur la figure 2.4.

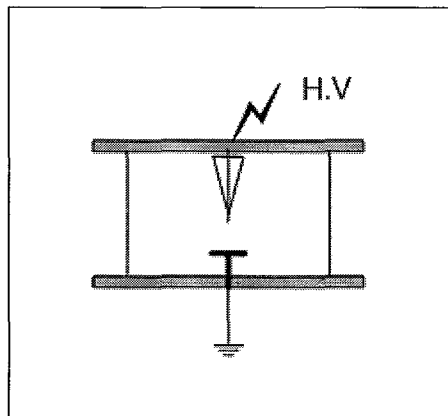


Figure 2.4 Spécimen point-plan.

Les transformateurs ont une faiblesse de blindage au niveau des joints; les décharges internes, comme celles produites par ce spécimen, peuvent donc être détectées en dehors de la carcasse. Pour plus de fidélité par rapport aux transformateurs couramment utilisés à Hydro-Québec, une cuve en plexiglas peut contenir le spécimen immergé dans de l'huile de transformateur. Pour créer une décharge, il faut injecter des bulles d'air dans l'huile, afin de modifier la rigidité diélectrique de l'isolant entre les deux électrodes. Le champ permanent suffit à créer une décharge.

Cependant, on s'intéresse aux décharges couronne, c'est-à-dire ayant de l'air comme isolant. Il ne faut pas donc confondre l'air servant d'isolant et celui autour du spécimen qui fait office de milieu de propagation des ondes. Entre les électrodes, des conditions de température et de pression sont différentes à cause du haut champ électrique, qui change le comportement physique de l'isolant.

2.5 Choix des antennes

La gamme de fréquence à mesurer est très grande (du DC jusqu'à 10 GHz), ce qui nécessite l'utilisation de plusieurs antennes larges bandes. La compagnie AH-Systems offre un kit permettant de couvrir une largeur de bande jusqu'à 18 GHz.

Voici une liste des antennes contenues dans le kit AK-18G:

- Log périodique (200 MHz-2 GHz)
- Antenne Horn (1 GHz-18 GHz)
- Antenne cadre (4 MHz-30 MHz)
- Antenne dipôle (200 MHz-500 MHz)
- Antenne biconique (30-300 MHz)

Les antennes biconiques et log-périodique sont les plus appropriées pour mesurer le bruit sur une bande de 2 GHz, ce qui couvre entièrement le spectre théorique des décharges partielles selon la revue de littérature.

2.6 Oscilloscope

Pour ces mesures, l'oscilloscope TDS6124C de Tektronix constitue un choix approprié, car il possède une bande analogique très large (12 GHz) avec une fréquence d'échantillonnage de 40 GS/s. Sa capacité de mémoire d'acquisition est de 64 M-échantillons et il est équipé de l'option FastFrame (voir annexe VII) qui permet l'enregistrement de plusieurs impulsions consécutives avec étiquetage temporel de chaque capture, et l'exportation des données peut se faire en fichier .txt, .wfm, .dat, .csv ou .jpeg. Pour plus de commodité, les formes d'ondes seront exportées au format DAT, afin d'être traitées sous MATLAB. En revanche, la rapidité d'acquisition et de calculs impose une entrée limitée à 5V Rms en tension pour une impédance de 50Ω . Cette condition nécessite des précautions lors des manipulations avec les antennes, d'autant plus que les pointes maximales des ondes ne sont pas prévisibles.

2.7 Montage

Pour les mesures, l'antenne est placée à 2 mètres du spécimen et est reliée directement à l'oscilloscope : ce montage est standard, mais par la suite des événements, des changements sont effectués.

- Par mesure de sécurité vis-à-vis de l'oscilloscope, des atténuateurs sont utilisés entre l'antenne et l'oscilloscope au cas où la puissance de bruit serait trop élevée.
- Si le signal est trop faible par rapport au bruit ambiant et que le spectre désiré se situe à des fréquences plus élevées, un filtre passe-haut et un amplificateur RF LNA sont insérés afin supprimer le bruit ambiant et d'augmenter la précision de lecture de l'oscilloscope autour des fréquences désirées.

Les mesures effectuées suivent le protocole décrit ci-dessous :

- L'antenne est dirigée en direction du spécimen, à 2m (position verticale pour la biconique)
- Un câble coaxial relie l'antenne à l'oscilloscope. Par la suite, l'atténuation du câble est notée pour faire le bilan de puissance afin d'évaluer l'amplitude de l'onde à la source.
- La fréquence d'échantillonnage de l'oscilloscope est fixée à une valeur supérieure au double de la fréquence maximale de l'antenne. Pour l'antenne biconique, la fréquence d'échantillonnage est de 2.5 GS/s et pour la LOG Périodique 10 GS/s.
- La fenêtre temporelle est fixée par défaut à 2 μ s et sera ajustée une fois la décharge observée, pour une meilleure visualisation.
- Le bruit ambiant est d'abord enregistré sur un fichier.DAT pour une fenêtre de 2 μ s. Par la suite, ce signal sera réutilisé pour servir de référence de mesures, afin d'avoir des données les moins parasitées. Parmi les bruits ambiants soustraits, figurent les ondes AM, FM, TV, GSM, Wi-Fi...
- Le déclenchement est positionné au dessus du double du niveau du bruit afin de capter toutes nouvelles formes d'onde ayant au moins cette amplitude.
- Le spécimen est alors alimenté et la tension est augmentée de façon incrémentale jusqu'à l'apparition de la forme d'onde de décharge à l'écran de l'oscilloscope.
- Dès que les décharges sont visibles, le Déclenchement est mis en mode « Single » ou « Norm » afin de pouvoir enregistrer les échantillons.
- La forme d'onde est exportée en fichier .DAT sur le disque dur d'un PC.

- Une série de mesures avec l'option FastFrame permet d'enregistrer plusieurs impulsions consécutives et de les assembler dans la même forme d'onde. 100 impulsions peuvent ainsi être stockées.

Les fichiers .DAT sont exploités sous MATLAB pour une analyse temporelle, fréquentielle et statistique.

2.8 Protection de l'équipement de mesure

Les ondes électromagnétiques peuvent causer des problèmes de compatibilité avec l'électronique des appareils de mesure (oscilloscope, analyseur de spectre, PC...). Pour s'assurer que ces appareils ne soient pas endommagés lors des manipulations en milieu bruyé, il est primordial de les protéger. La solution la plus simple et la moins coûteuse serait de les éloigner le plus possible du bruit électromagnétique, en tirant des longs câbles coaxiaux entre l'antenne et l'oscilloscope. Mais il faut prendre en compte la perte du signal dans le câble lors du calcul de puissance de l'onde émise. Si possible, l'équipement doit être placé dans une cage de Faraday ou à l'intérieur de toute structure semblable, tandis que l'antenne doit être installée à l'extérieur.

2.9 Résultats de simulation avec un générateur de signaux

Avant de procéder aux mesures avec antennes, une première approche consiste à générer un signal proche de la forme d'onde d'une décharge partielle et de l'injecter directement dans l'oscilloscope. Il s'agit de tester dans un premier temps l'aptitude de ce dernier à capturer une décharge de très courte durée (10-300 ns) grâce au déclenchement d'amplitude, et dans un deuxième temps de trouver un moyen d'exploiter les données de la forme d'onde enregistrée avec un programme MATLAB.

Le signal à l'entrée de l'oscilloscope est produit par le générateur AWG2041 de Tektronix, qui permet de créer une forme d'onde à partir d'une formule mathématique. D'après la revue de littérature, la formule suivante paraît toute indiquée :

Erreur ! Des objets ne peuvent pas être créés à partir des codes de champs de mise en
forme. (2.2)

Le signal est généré de la façon suivante :

- De 0 à $1\mu\text{s}$, il vaut 0
- De $1\mu\text{s}$ à $1.3\mu\text{s}$, il vaut $V(x)$
- De $1.3\mu\text{s}$ à $2\mu\text{s}$, il vaut 0.

Grâce à un déclenchement manuel du générateur, le signal apparaît comme une impulsion simple auprès de l'oscilloscope, ce qui permet de mettre à l'épreuve la performance de celui-ci en matière de détection. Le déclenchement de l'oscilloscope est réglé en amplitude et il est important de vérifier que le niveau est supérieur à celui du bruit ambiant avant le déclenchement de la décharge. Une fois la forme d'onde récupérée, il est facile d'en extraire le spectre de fréquences.

La première série de mesures tente de reproduire la méthodologie de PJ.Moore [19]. L'oscilloscope est réglé, comme dans l'article, de la façon suivante : 2.5 GS/s, fenêtre temporelle de $2\mu\text{s}$. Toujours à l'aide du générateur AWG20741, on génère le signal de l'onde électromagnétique avec un multi-trajet représentant la résonnance du blindage de l'équipement. L'équation du signal est de la forme :

Erreur ! Des objets ne peuvent pas être créés à partir des codes de champs de mise en
forme. (2.3)

$$f_1 = 100 \text{ MHz}, f_2 = 300 \text{ MHz}.$$

Le signal tel qu'il apparaît à l'écran de l'oscilloscope et son spectre sont représentés à la figure 2.6.

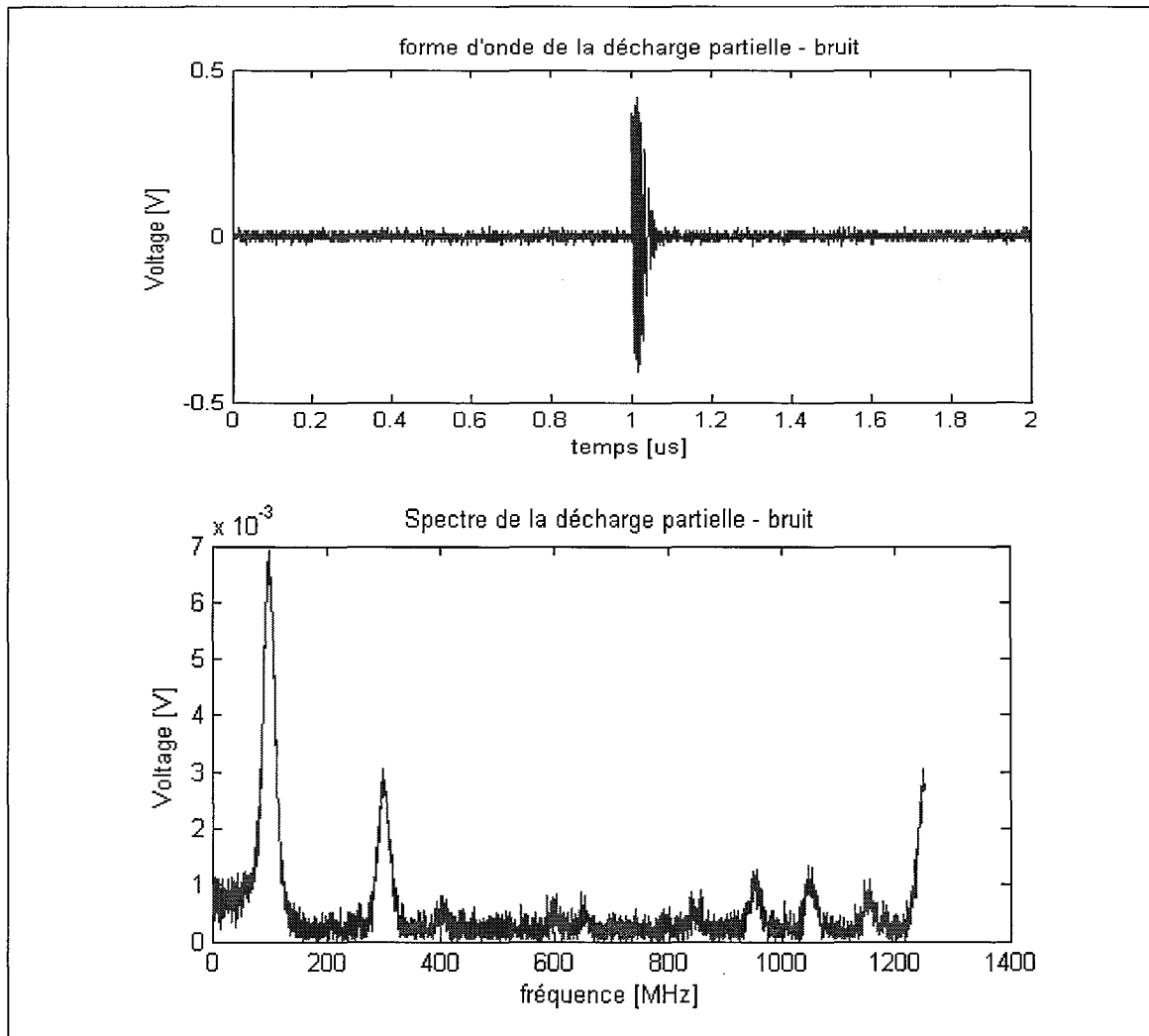


Figure 2.5 Capture et traitement MATLAB d'une décharge théorique.

On observe bien les deux pics fréquentiels représentant le signal principal (100 MHz) et le signal de résonance (300 MHz).

Une autre méthode de mesure est de configurer l'oscilloscope en mode FastFrame, comme l'indique l'article de P.J. Moore [19]. La première étape consiste à choisir une fréquence d'échantillonnage de 2.5 GS/s (8 bits par échantillon), avec une fenêtre de 2 μ s (soit 200 ns par division), comme pour la capture de la figure 2.6.

Le mode FastFrame doit être configuré pour X enregistrements d'impulsions, avec 5000 échantillons par capture. Le déclenchement est fixé sur le mode SINGLE (ou mode normal du déclenchement d'amplitude), ainsi pour chaque impulsion détectée, l'oscilloscope va les « concaténer » les unes à la suite des autres (voir annexe VII).

Par exemple, pour une fenêtre de $2\mu\text{s}$, et pour 10 impulsions générées, l'oscilloscope enregistre un signal de $20\mu\text{s}$ (fig.2.6).

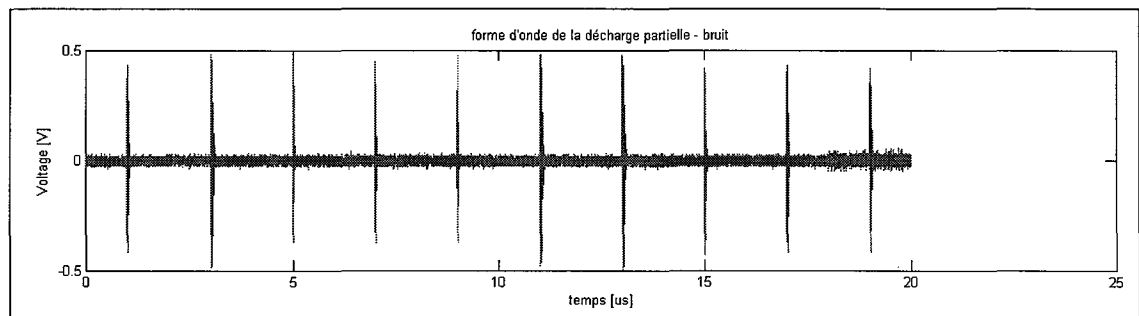


Figure 2.6 FastFrame temporel sur 10 captures.

Le spectre du signal entier est calculé à la figure 2.7.

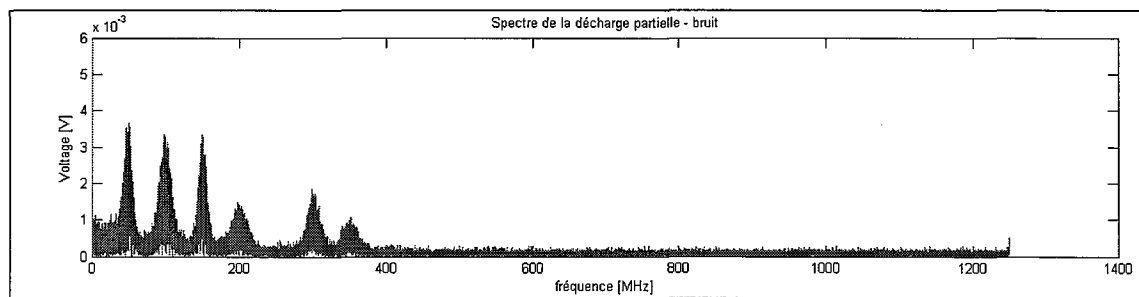


Figure 2.7 Spectre de l'enregistrement FastFrame.

Pour cet exemple, trois signaux avec 2 multi-trajets (chaque fréquence est différente) ont été utilisés, ce qui explique la présence de 6 fréquences différentes sur le spectre.

Néanmoins, l'option FastFrame est limitée en précision car pour cette configuration d'acquisition le temps mort entre deux captures est de $6\mu s$, ce qui n'empêche en rien une étude statistique sur les fréquences, mais il complique l'évaluation du taux de répétition des décharges.

2.10 Conclusion

La technique proposée permet de détecter les décharges partielles et de les enregistrer. L'option FastFrame de l'oscilloscope est d'une grande utilité, notamment pour faire une moyenne statistique des mesures et permettre une généralisation sur le spectre des décharges. Les fichiers .DAT sont exploitables sur MATLAB et permettent de restituer la forme d'onde observée à l'écran de l'oscilloscope et de déduire le spectre fréquentiel à partir des échantillons et de la fréquence d'échantillonnage. Le montage est donc opérationnel pour effectuer les mesures de décharges partielles avec les antennes choisies dans le paragraphe 2.5.

CHAPITRE 3

MESURE DES INTERFÉRENCES

3.1 Présentation du laboratoire CTT

Le laboratoire CTT (Centre Technique et Thermique) est équipé d'une source de tension et d'un transformateur pouvant délivrer jusqu'à 20 kV de tension. Les spécimens de décharges mis à notre disposition sont disposés sur une table en bois au centre de la pièce. Une grille de protection faisant office de cage de Faraday sépare l'ensemble (transformateur + spécimens) des utilisateurs et du générateur délivrant la tension. Une fois la grille de sécurité fermée, le spécimen peut être alimenté en tension. Les antennes se trouvent du côté du transformateur, et un long câble coaxial passant à travers la grille les relie à l'oscilloscope qui est installé du côté sécurisé.

3.2 Mesure du spécimen électro-tronqué

L'électro-tronqué est un morceau de barre cuivrée, de forme rectangulaire avec un cœur conducteur en cuivre, entouré d'un isolant d'époxy-mica et recouvert d'une bande noire faisant office de masse. Il s'agit en fait d'une barre de générateur qui est utilisée en milieu haute tension et testée au laboratoire CTT pour étudier le comportement du courant de décharges partielles, voir la figure 3.1.

En utilisant ce dispositif, il est attendu qu'un champ électromagnétique soit créé à partir du courant de décharge. La partie cuivrée (à gauche) est branchée à la source de tension (5-20 kV) comme sur la photo de la figure 3.1. Les décharges ont lieu à l'intersection du ruban noir avec l'isolant et sont irradiés selon l'axe de la frontière.

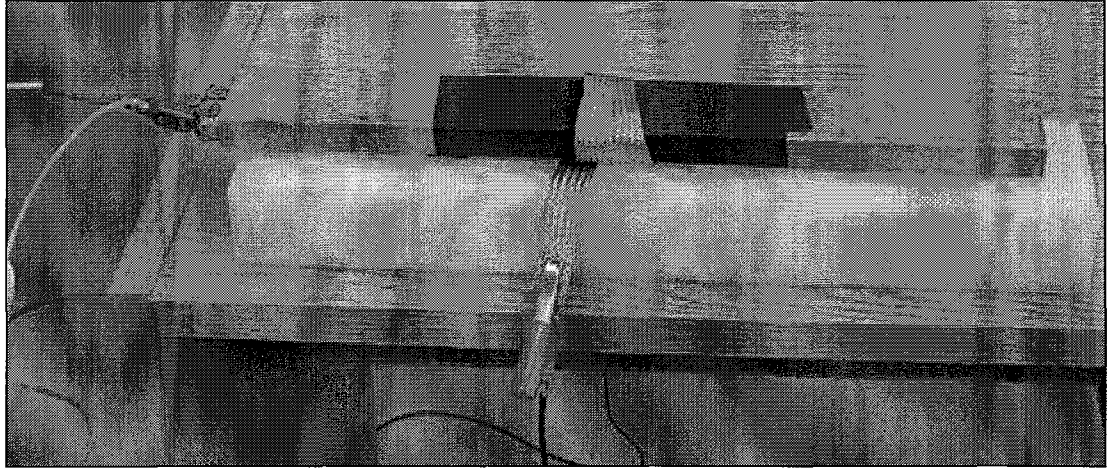


Figure 3.1 **Spécimen électro-tronqué.**

Pour une meilleure réception du signal, l'antenne est orientée verticalement et placée à 1 m du spécimen, à hauteur de la table. Avant de procéder aux mesures des décharges, la méthodologie impose de capturer le spectre du bruit ambiant, pour ne pas fausser les données recueillies par la suite. L'antenne reste donc à sa place, l'oscilloscope est configuré de telle façon que pour les mesures de décharges, la forme d'onde du bruit soit capturée et stockée dans un fichier.DAT. Par la suite, on se sert du spectre du bruit comme référence pour corriger celui des décharges partielles « parasitées ».

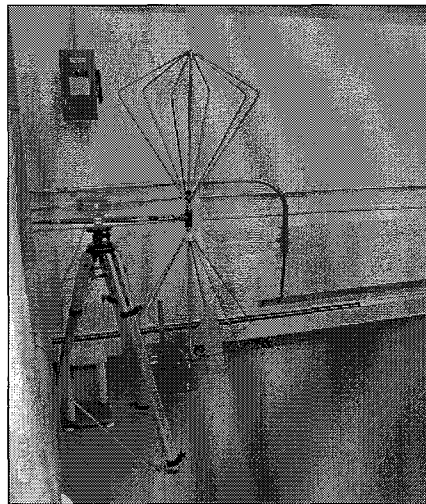


Figure 3.2 **Antenne biconique 30-300 MHz.**

Sans surprises, le bruit ambiant enregistré avant les mesures correspond aux ondes de la radio FM (Fig 3.3). Elles sont enregistrées pour chaque antenne afin d'avoir l'amplitude appropriée selon la disposition du montage.

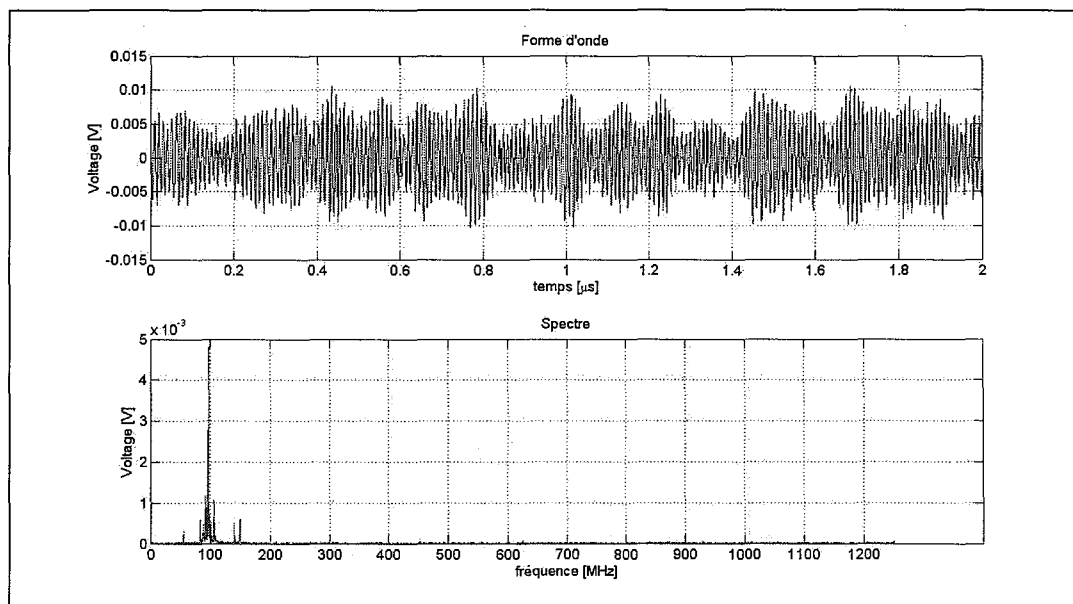


Figure 3.3 Bruit ambiant du CTT.

Lors de la mise sous tension du spécimen, l'oscilloscope enregistre un signal semblable à celui d'une décharge ; il s'agit en fait du bruit engendré par le générateur lors du passage d'un niveau de tension à un autre. Il ne faut donc pas enregistrer ce signal.

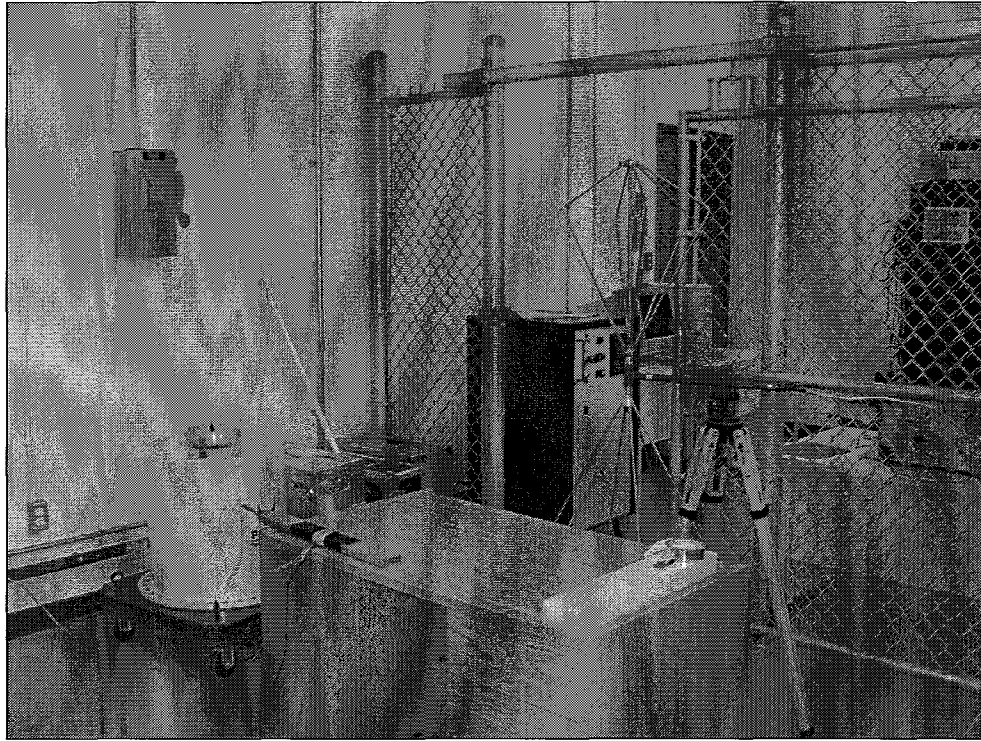


Figure 3.4 Dispositif de mesure pour le spécimen électro-tronqué.

On observe les décharges à l'oscilloscope à partir de 5 kV, et d'autres phénomènes sont aussi observés : un grésillement sonore et une odeur d'ozone se font sentir. À l'aide d'une caméra UV ou si la salle était plongée dans le noir, il serait également possible d'observer des éclairs bleus à l'endroit où les décharges ont lieu.

Pour avoir une idée globale sur le contenu fréquentiel des décharges, l'option FastFrame de l'oscilloscope est programmée pour enregistrer 50 impulsions et pour différents voltages : 5, 7, 9, 10, 11, 12 kV (Fig 3.5).

Un programme MATLAB permettra ensuite de faire la moyenne de l'amplitude et de la fréquence de chaque série afin de déterminer l'influence de l'alimentation sur le spectre des décharges.

La gamme de fréquences est ainsi beaucoup plus précise que pour une seule impulsion et il est possible de faire une étude statistique sur la génération des décharges, sur l'influence du voltage sur le spectre et la forme d'onde.

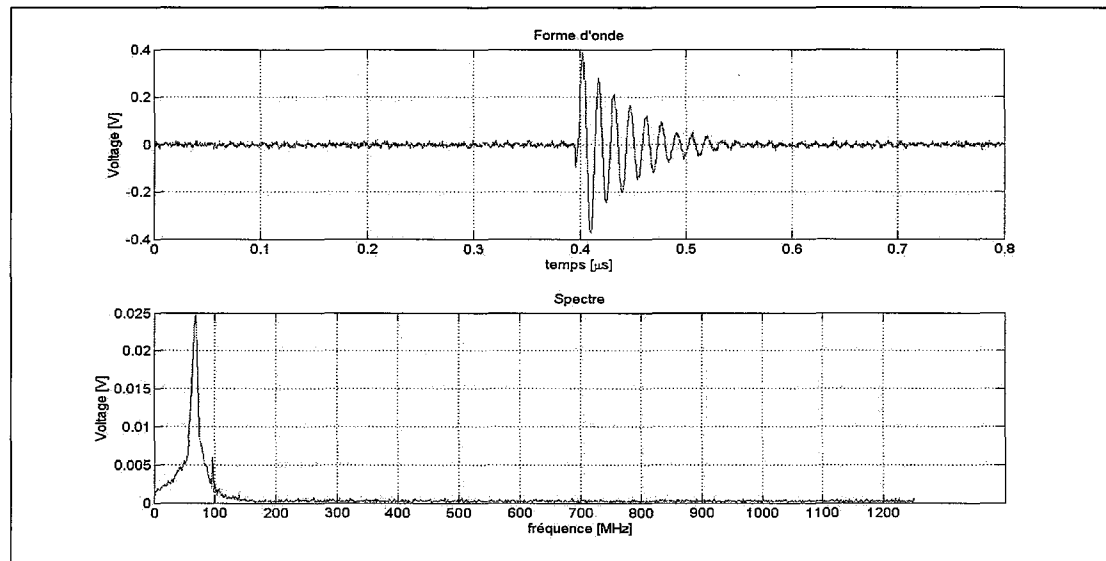


Figure 3.5 Décharge partielle sous 10 kV.

Les valeurs enregistrées révèlent que le spectre fréquentiel est indépendant du voltage appliqué, c'est-à-dire que la fréquence associée à l'onde reste la même.

En revanche l'amplitude maximale des ondes et du spectre sont proportionnelles à la tension d'alimentation du spécimen (Figure 3.6).

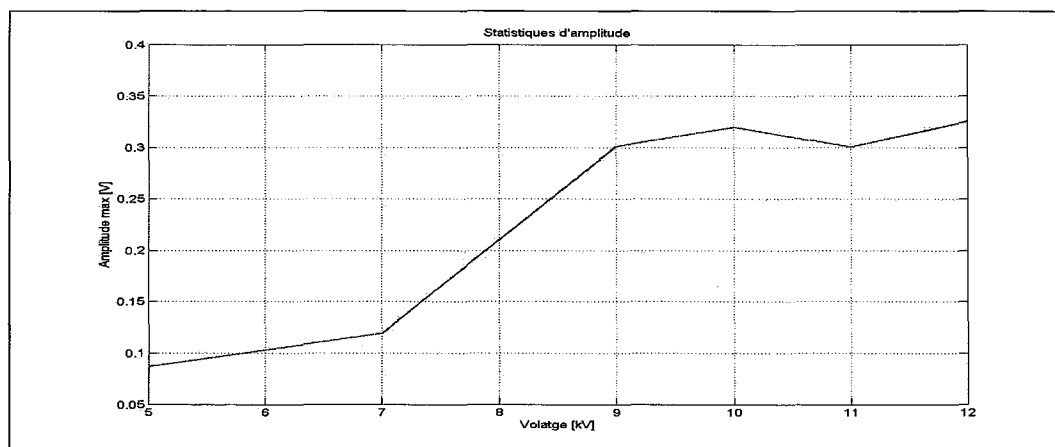


Figure 3.6 Évolution de l'amplitude des ondes en fonction du voltage d'alimentation du spécimen.

3.3 Mesure du spécimen point-plan

Le montage est illustré à la figure 3.7 et il correspond en particulier au bruit couronne susceptible d'être généré sur les lignes hautes tensions.

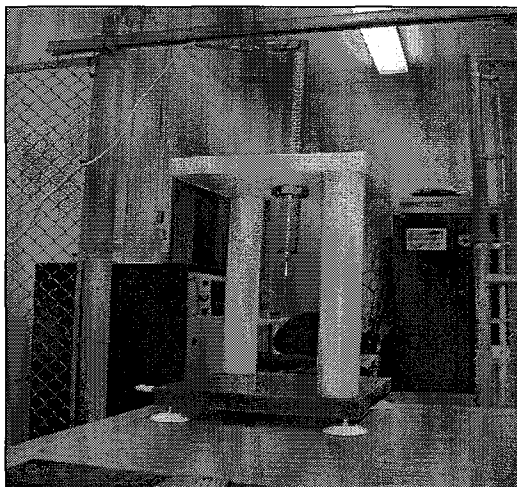


Figure 3.7 Spécimen point-plan.

Pour assurer l'intégrité du matériel de mesure en laboratoire, l'expérience ne permet pas de pousser le voltage plus haut que 7 kV et l'aiguille plus bas que 3 cm par rapport à l'électrode plane.

Dans ces conditions, des décharges sont observables, mais le signal des ondes FM reste très présent autant dans le domaine temporel que dans le domaine fréquentiel.

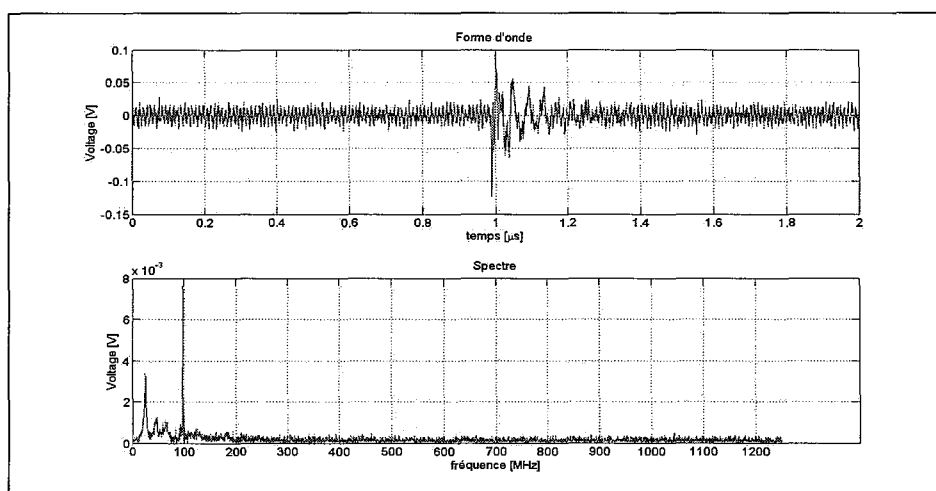


Figure 3.8 **Forme d'onde et spectre du spécimen point-plan à 7 kV et pour un espacement de 3 cm.**

Pour ne pas fausser les données statistiques, il faut supprimer le spectre de la radio FM, sans pour autant déformer celui du signal. La fréquence du bruit étant dans la bande du signal, un filtrage ne peut pas être appliqué. Le programme MATLAB va donc soustraire le spectre réel du bruit de celui de la décharge partielle, ou en d'autre terme : retirer les valeurs de l'amplitude de la raie à 100 MHz au spectre total de l'enregistrement. Ainsi pour le même signal, le spectre devient celui de la figure 3.9.

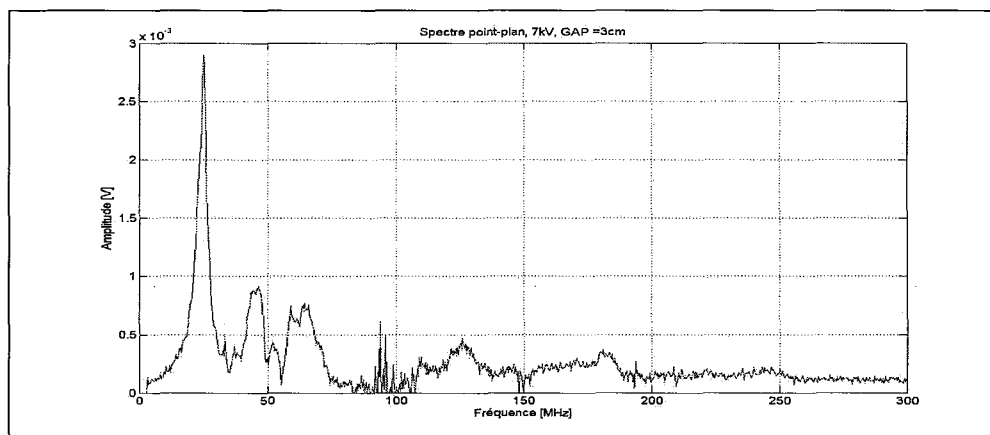


Figure 3.9 Spectre du spécimen point-plan sans le bruit FM.

3.4 Le spécimen Tesla-coil

Tout comme le point-plan, ce spécimen est muni d'une aiguille, mais beaucoup plus large, plus longue, et soumise à une très haute tension (50 kV). Ce montage permet de voir le spectre du bruit généré avant et pendant un arc électrique. Un objet métallique servira d'électrode-masse.

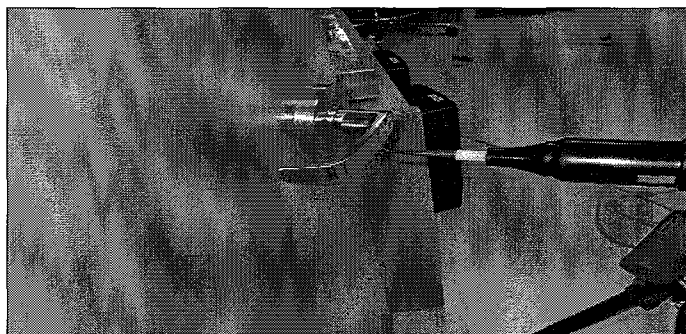


Figure 3.10 Spécimen Tesla-coil.

Deux mesures sont faites : le bruit généré par le spécimen seul, c'est-à-dire sans électrode, et le bruit généré quand un arc électrique est observé entre la pointe et l'objet métallique.

Contrairement aux spécimens précédents, celui-ci génère un bruit de très forte amplitude, une atténuation de -20 dB est donc nécessaire pour protéger l'oscilloscope.

La forme d'onde et le spectre du Tesla-coil sans arc est selon la figure 3.11.

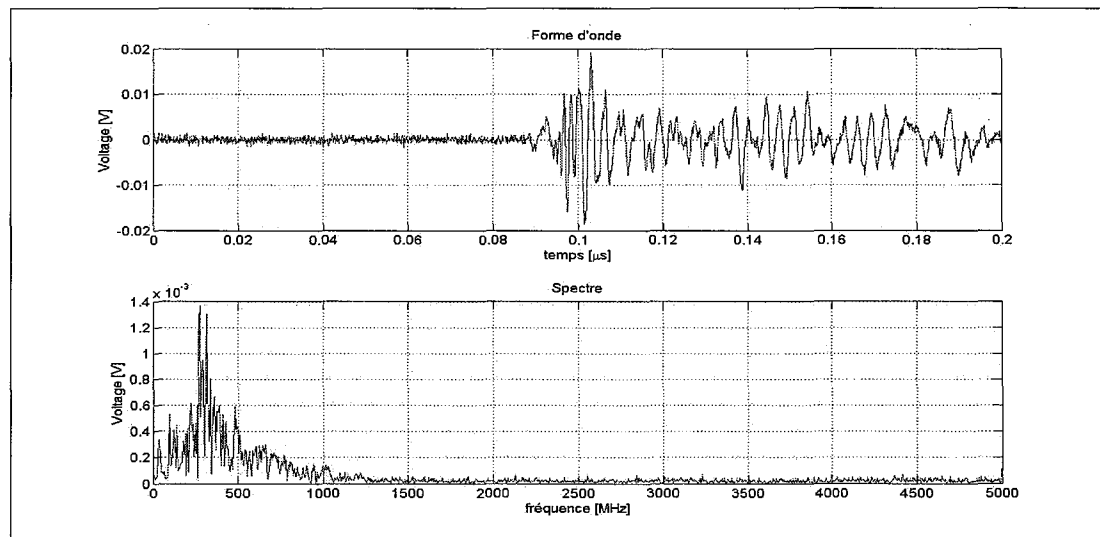


Figure 3.11 Bruit sans arc électrique.

Ensuite, avec un objet métallique située à 1 cm de la pointe, un arc électrique visible à l'œil nu est généré (figure 3.12).

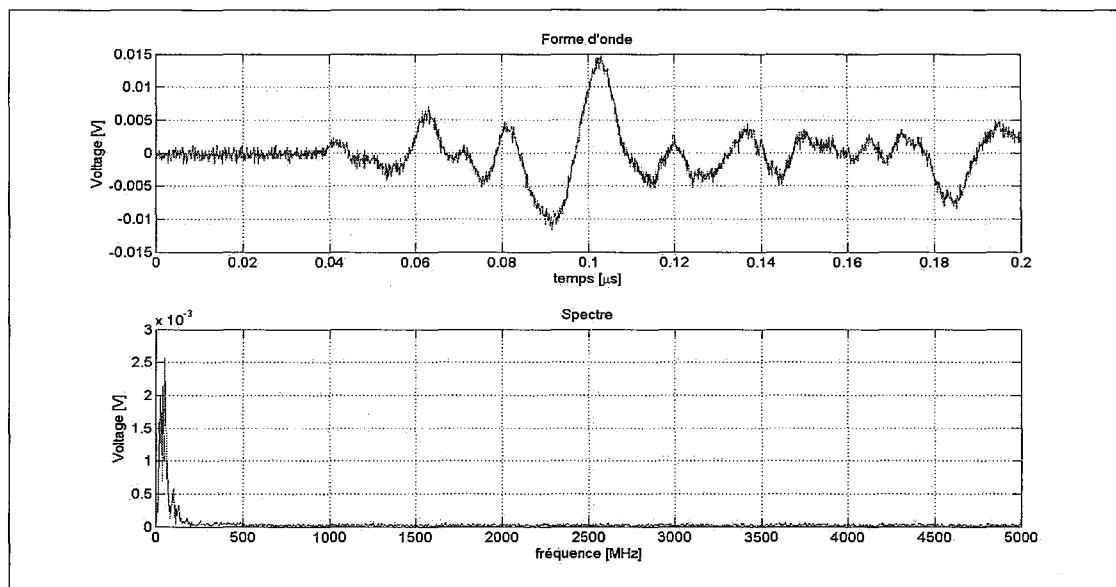


Figure 3.12 Bruit avec arc électrique.

Quelques remarques par rapport à la forme d'onde et au spectre du Tesla-coil sont nécessaires. Premièrement, dans le graphe temporel, la période de l'onde est plus longue lorsqu'un arc se produit (Fig 3.12), ce qui a pour conséquence de diminuer la largeur du spectre associé. D'un point de vu physique, ce phénomène peut être interprété comme une orientation des électrons libres avoisinant la pointe du Tesla-coil vers l'objet métallique. Sans une deuxième électrode pour attirer les électrons, ces derniers sont éjectés selon la direction radiale de la pointe du Tesla-coil, mais si un courant parvient à se créer entre les deux électrodes, alors très peu d'électrons parviendront à s'échapper.

Deuxièmement, si l'on fait abstraction de la modulation de ce signal, on remarque un temps de montée (de 0.08 à 0.1 μs) et un temps de descente (0.1 à 0.2 μs), ce qui correspond au courant de décharge partielle (voir 2.2). Le fonctionnement du Tesla-coil diffère des autres spécimens de décharges. Un transformateur et un circuit RL sont intégrés dans le manche, augmentant ainsi la fréquence du courant ainsi que la tension délivrée. Au vu de la distance nécessaire pour faire apparaître un arc électrique (1.5 cm), on peut conclure que la tension

délivrée avoisine les 50 kV, car la rigidité diélectrique de l'air est de 36 kV pour 1 cm. La fréquence, quant à elle, est de l'ordre de la centaine de KHz voir du MHz.

3.5 Évaluation du taux de répétition

Afin d'évaluer le taux de répétition des décharges, deux méthodes sont proposées:

Première méthode :

La première consiste à utiliser l'option FastFrame de l'oscilloscope TDS6124C, et d'enregistrer 100 impulsions pour voir la durée d'enregistrement entre la première et la dernière capture.

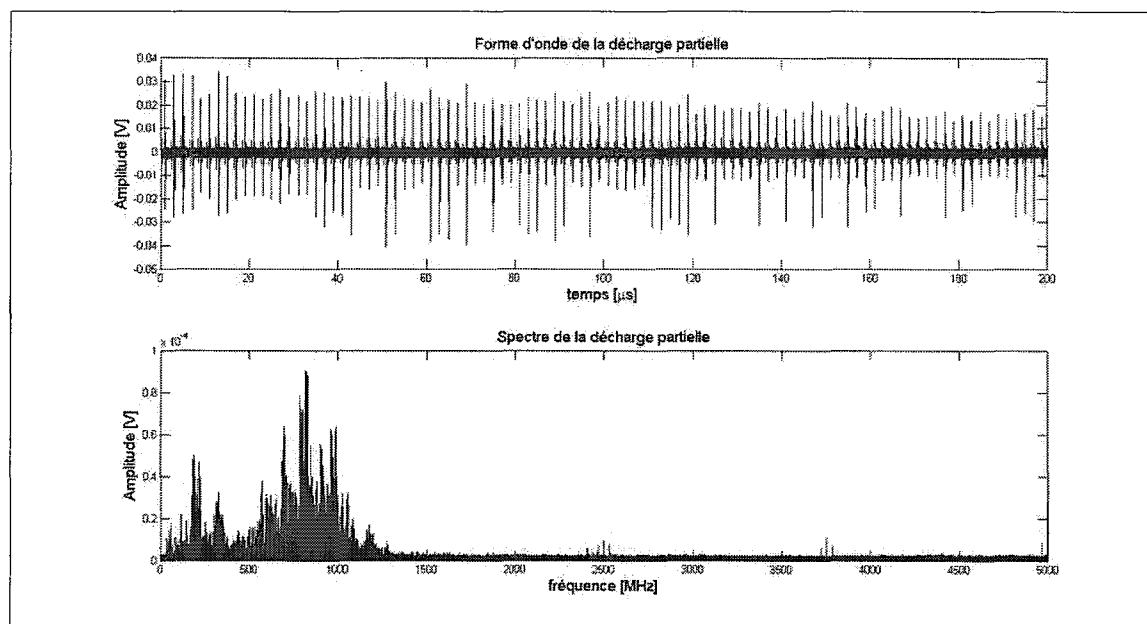


Figure 3.13 100 impulsions FastFrame avec antenne Wi-Fi 2.4 GHz.

Après lecture des étiquettes temporelles, la durée entre le premier et dernier enregistrement est de 1.2 secondes.

Le bruit de l'oscilloscope semble être problématique pour la lecture et l'enregistrement des décharges. Pour une meilleure évaluation du nombre de décharges, il faut limiter la fréquence d'échantillonnage et la fenêtre temporelle, ce qui a pour effet de diminuer le bruit de fond, permettant ainsi une meilleure distinction des décharges et un temps de traitement de l'information plus rapide.

En prenant un temps d'échantillonnage de 250 MS/s et une fenêtre de 2 μ s, pour 100 impulsions, l'oscilloscope a enregistré une durée de 532 ms.

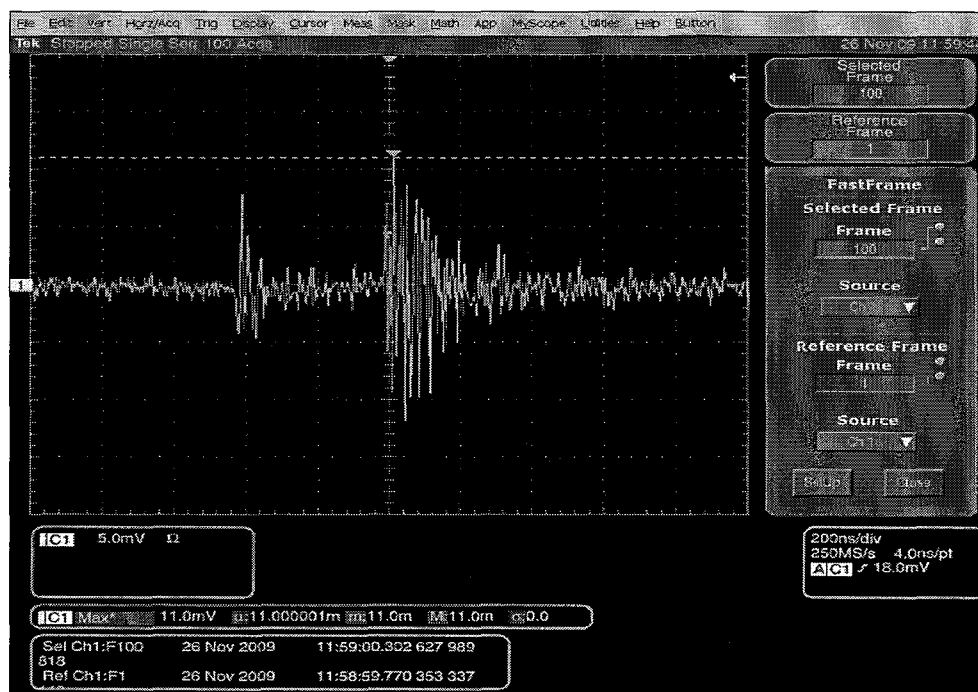


Figure 3.14 Capture de lecture FastFrame à l'oscilloscope.

À l'aide des informations de l'option «Read Out», on peut lire le temps d'enregistrement de la première impulsion et celui de la 100^{ème}, mais également la différence entre les deux.

Néanmoins, le temps mort entre deux captures (soit 6 μ s) reste tout de même un problème à surmonter, car plusieurs impulsions ont sûrement été omises entre deux enregistrements.

Deuxième méthode :

Une deuxième méthode consiste à enregistrer une fenêtre temporelle de 1.6 ms et de compter le nombre d'impulsions. Là encore, l'oscilloscope est programmé pour afficher les pics d'impulsions et non pour contenir l'information des formes d'ondes. Une fréquence d'échantillonnage basse est donc nécessaire.

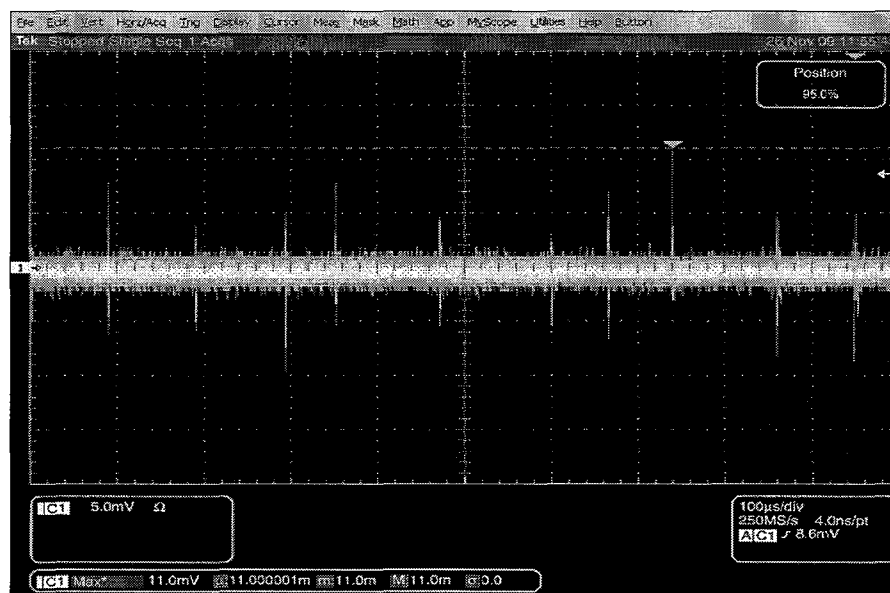


Figure 3.15 Capture de 1 ms de décharges.

Pour 1 ms d'enregistrement, 10 décharges figurent à l'écran (figure 3.15). Il ne faut pas considérer cette capture comme une observation absolue, car les décharges ont lieu tous les demi-cycles d'alimentation, il se peut donc que le dispositif capte une fin ou un début de rafale de décharges. Pour une meilleure analyse des résultats, il faudrait placer la tension d'alimentation du spécimen sur la deuxième entrée de l'oscilloscope et superposer les deux courbes. Dans un premier temps, cela permettrait de vérifier que la génération de décharges partielles a bien lieu à chaque demi-cycle de 60 Hz, et dans un deuxième temps, de régler le trigger de capture des décharges sur un niveau de tension d'alimentation où l'on est sûr que la première décharge de la période est créée.

Remarques : combinaison des deux méthodes

Comme il a été souligné pour la méthode 1, l'option FastFrame impose un temps mort de 6 μ s entre chaque capture à cause du traitement des informations. Sur le graphe de la méthode 2, on observe que la plus petite durée entre deux décharges partielles est de 50 μ s (1/2 division). Dans cette situation, le temps mort du FastFrame n'est pas problématique et l'onde peut donc considérer le taux de répétition de la méthode 1 comme proche de la réalité, à savoir 100 impulsions pour 532 ms.

3.6 Étude à 2.4 GHz

Jusqu'à présent, les mesures effectuées montrent que le bruit des décharges partielles s'arrête non seulement bien avant 2.4 GHz, mais aussi que l'amplitude minimale des ondes est supérieure à 1 mV. C'est en fait la précision offerte par l'oscilloscope qui limite l'amplitude des mesures. Il serait donc intéressant de voir si l'on augmente la précision de lecture de l'oscilloscope à l'échelle du μ V, il y aurait une détection d'un spectre autour de 2.4 GHz susceptible de chevaucher celui du Wi-Fi.

3.6.1 Montage

Pour observer le spectre du bruit autour de 2.4 GHz avec une plus grande précision, il faut imaginer un nouveau montage de mesure : une antenne de routeur Wi-Fi, un filtre passe-haut et un amplificateur LNA sont nécessaires (voir annexes VIII et IX). Le spécimen Tesla-coil est idéal car il fournit un spectre très large et ne nécessite pas d'opérer dans un laboratoire haute tension. Le filtre passe-haut $f_{co}=1800$ MHz sert à filtrer les fréquences enregistrées précédemment, à savoir une bande fréquentielle allant de 500 MHz à 1.5 GHz. Le filtre sert également à protéger l'oscilloscope, car l'amplification du LNA augmente également l'amplitude de la bande dominante du Tesla-coil. L'amplificateur sert à rendre les valeurs du signal, qui sont de l'ordre du μ V, visibles à l'oscilloscope.

Par exemple pour un amplificateur LNA à 25 dB, un signal à 10 μ V sera lu comme étant à 0.2 mV.

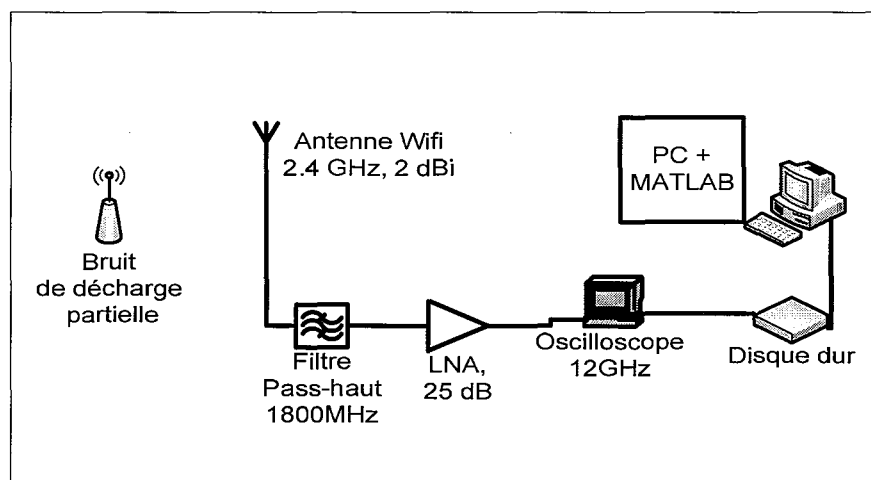


Figure 3.16 Montage mesure autour de 2.4 GHz.

Ce montage impose de s'assurer que la puissance RF sortant du filtre n'endommage pas l'amplificateur LNA, mais aussi que la puissance RF sortant de l'amplificateur n'endommage pas l'oscilloscope TDS6124C, lequel est limité en entrée à 5 V (27 dBm). Il faut donc connaître la puissance du signal à la sortie de l'antenne, puis à la sortie du filtre et enfin à la sortie du LNA.

3.6.2 Mesures avec antenne uniquement

Cette première série de mesures consiste à tester les performances de l'antenne Wi-Fi commerciale face au bruit électromagnétique généré par le Tesla-coil. Il s'agit de vérifier dans un premier temps l'étendue du spectre offert par l'antenne tant au niveau de l'amplitude que de la fréquence, afin de savoir si le filtre passe-haut a la capacité d'atténuer le signal aux fréquences en deçà de 1800 MHz.

Pour une décharge, la figure 3.17 montre le contenu temporel et spectral.

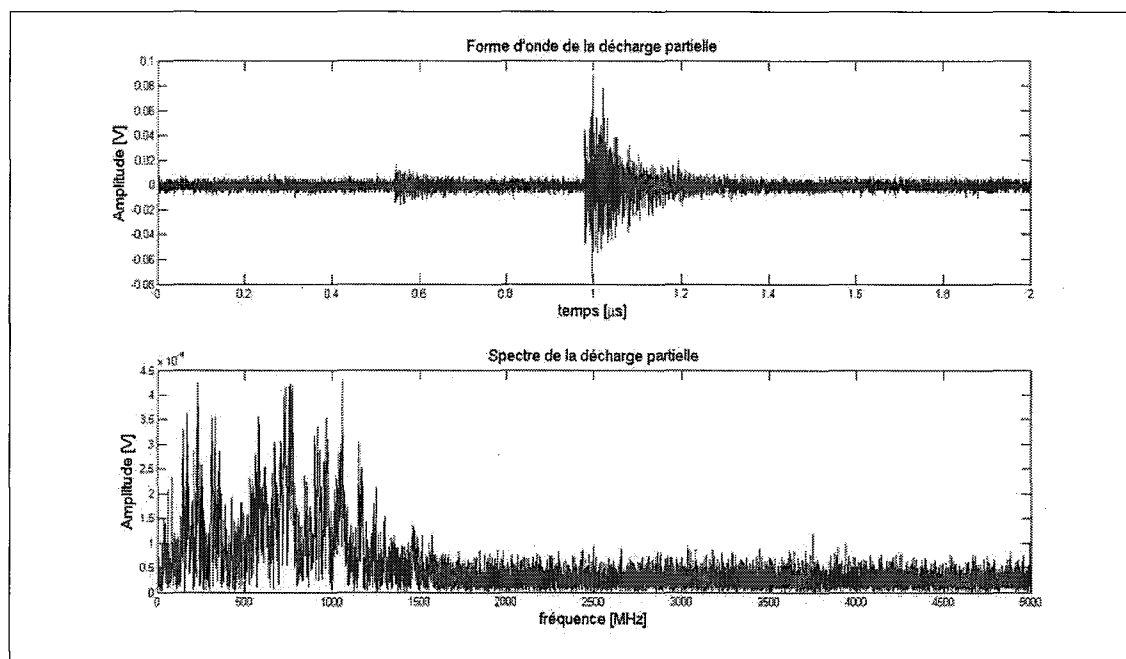


Figure 3.17 Bruit Tesla-coil mesuré avec une antenne Wi-Fi 2.4 GHz.

L'antenne commerciale n'est pas large bande donc elle atténue le signal en dessous de 2.4 GHz (voir annexe IX), ce qui explique le fait que la mesure n'ait pas eu besoin de -20 dB d'atténuation comme pour les premières captures (3.2.2) avec le Tesla-coil. De plus, on remarque que le spectre est beaucoup plus large qu'avec l'antenne Log Périodique. Cela peut s'expliquer par le fait que l'antenne Wi-Fi soit omnidirectionnelle, à l'inverse de la Log Périodique qui est unidirectionnelle.

Afin de vérifier les mesures qui ont été faites avec le kit d'antennes AK-18G, la forme d'onde du bruit du Tesla-coil est enregistrée avant et pendant un arc électrique. La fenêtre temporelle est de 2 μs. La figure 3.17 correspond au bruit avant arc, c'est-à-dire lorsque la pointe du Tesla-coil n'est pas rapprochée d'un objet métallique. Pour créer un arc électrique, la pointe est placée à 1.5 cm d'une électrode.

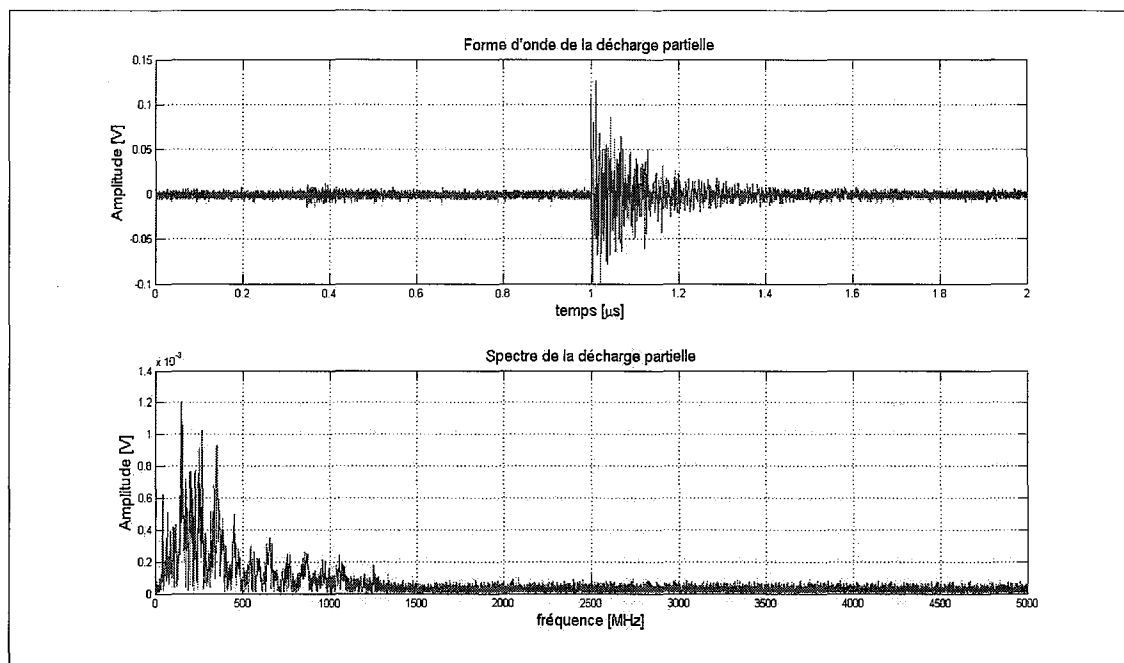


Figure 3.18 Décharge partielle pendant un arc électrique.

Deux remarques sont à faire sur les figures 3.17 et 3.18 :

- **Remarque 1** : tout comme les mesures avec l'antenne LOG périodique (200-2000 MHz), le spectre fréquentielle se voit réduit pendant la génération d'un arc. La fenêtre temporelle étant beaucoup plus grande lors des mesures avec l'antenne Wi-Fi (2 μ s avec l'antenne Wi-Fi, et 0.2 μ s avec l'antenne Log périodique), la durée de l'impulsion est la même pour les deux décharges (sans et pendant arc), à savoir environ 400 ns.
- **Remarque 2** : le comportement du spectre est le même certes, mais les valeurs sont bien différentes. Lorsqu'un arc est produit, l'amplitude des basses fréquences augmente beaucoup plus vite que celle des hautes, ce qui donne l'impression d'un rétrécissement de la bande.

3.6.3 Mesures avec antenne et filtre passe-haut 1800 MHz

Avant d'amplifier le signal de 25 dB (soit multiplier la puissance RF par 317), il faut s'assurer que le signal temporel ait une amplitude en dessous du seuil critique pour ne pas endommager l'oscilloscope.

L'entrée de l'oscilloscope ne peut dépasser 5V pour une impédance de 50 Ω , soit 27 dBm ($10\log(\frac{(5V)^2}{50\Omega})$).

Le signal en entrée doit respecter l'inégalité suivante :

Erreur ! Des objets ne peuvent pas être créés à partir des codes de champs de mise en forme.

Pour cela, le filtre passe-haut 1800 MHz est inséré seul entre l'antenne et l'oscilloscope, et la tension RMS doit être inférieure à 280 mV lors du déclenchement des décharges du Tesla-coil. L'onde mesurée avec l'antenne a une amplitude de 100 mV (-7 dBm), ce qui respecte à la fois la protection de l'oscilloscope et de l'amplificateur LNA qui est limité en entrée à 17 dBm (Annexe IX).

3.6.4 Mesures avec antenne, filtre, et amplificateur LNA 25 dB

Une première approche consiste à observer le contenu fréquentiel ambiant généré par le Tesla-coil sur un analyseur de spectres en produisant un arc électrique à 14 m de l'antenne Wi-Fi. La figure 3.19 montre le spectre du bruit ambiant de la salle de mesure, avant la mise sous tension du Tesla-coil.

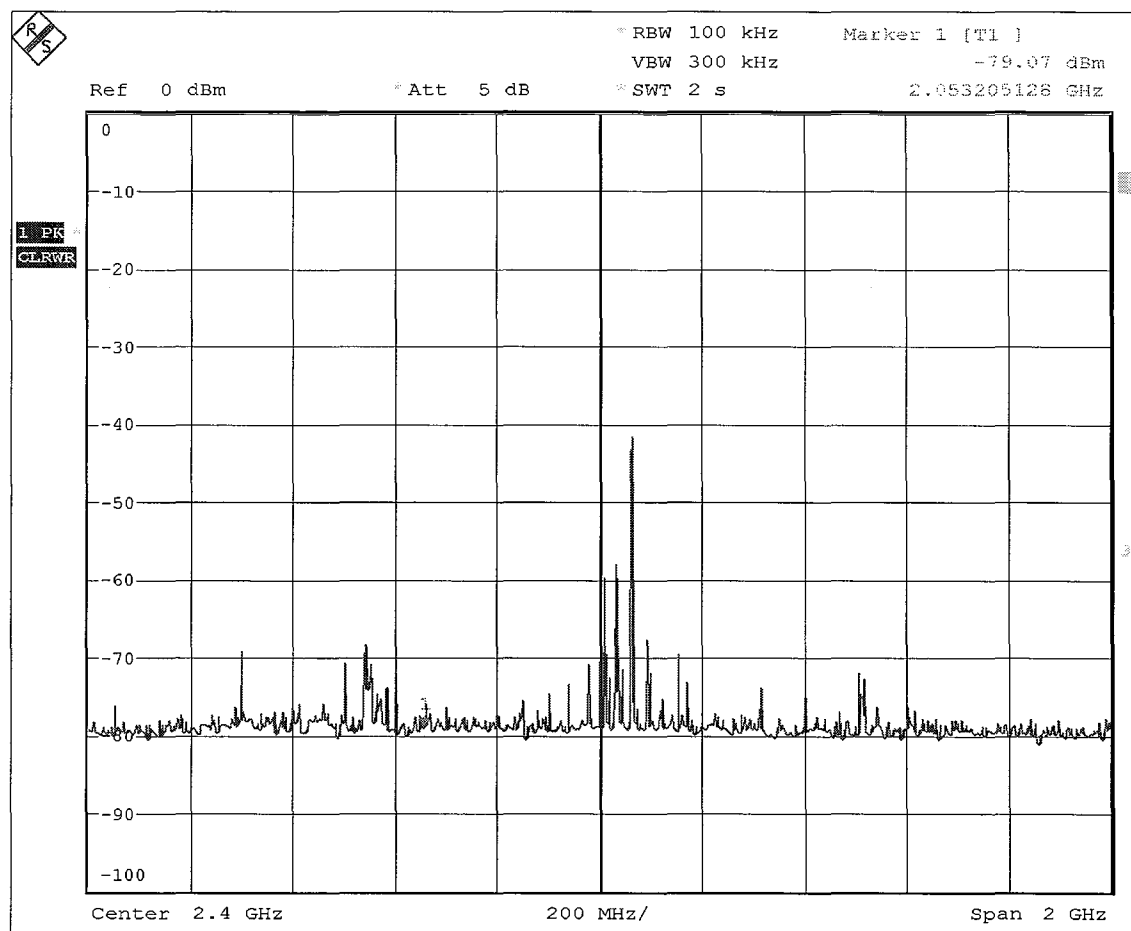


Figure 3.19 Spectre Wi-Fi.

Les raies appartenant au spectre du Wi-Fi (au centre) sont dominantes et atteignent une amplitude de -40 dBm. Toutefois, en visualisation directe, le spectre varie en amplitude. Dans les mesures suivantes, il se peut que la puissance ne soit pas toujours égale à -40 dBm.

À présent, le Tesla-coil est activé et produit un arc électrique avec une structure métallique du laboratoire. L'espacement varie entre 3 cm et 2.5 mm. Le but de ces mesures est dans un premier temps d'observer si le contenu fréquentiel du bruit du Tesla-coil chevauche les raies du Wi-Fi et dans quelle proportion, et dans un deuxième temps, de constater l'influence de l'espacement (séparation) sur ces fréquences. Le montage correspondant à la source de bruit est illustré à la figure 3.20 : un radiateur sert d'électrode masse, tandis que le Tesla-coil

est fixé à la table. Pour chaque série de mesure, le radiateur est rapproché de la pointe du Tesla-coil, et avec un espacement mesuré au dixième de millimètre près.

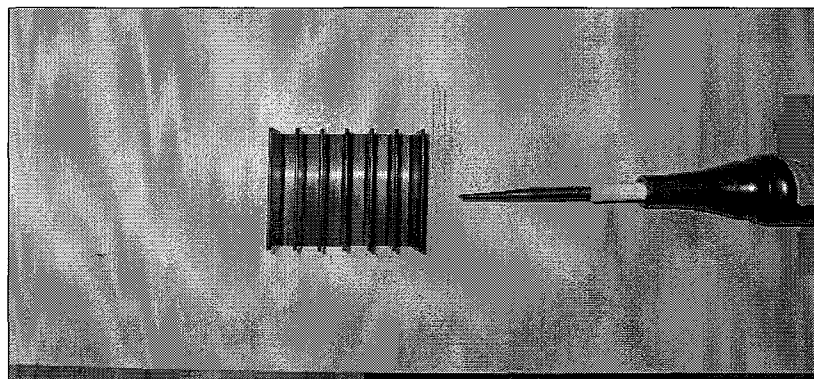


Figure 3.20 Montage émetteur Tesla-coil avec différents espacements.

Le bruit est observé pour les espacements suivants : 3 cm, 1 cm, 5 mm et 2.5 mm, et le Tesla-coil est placé à 14 m de l'antenne. En faisant passer les espacements de 3 cm à 5 mm, aucune différence majeure entre les spectres n'est à remarquer au niveau de l'amplitude. En revanche, pour l'espacement 2.5 mm, le spectre subit un gain de 10 dB par apport aux espacements précédents.

Prenons par exemple les spectres du Tesla-coil pour l'espacement 1 cm (figure 3.21) et celui pour 2.5 mm (figure 3.22).

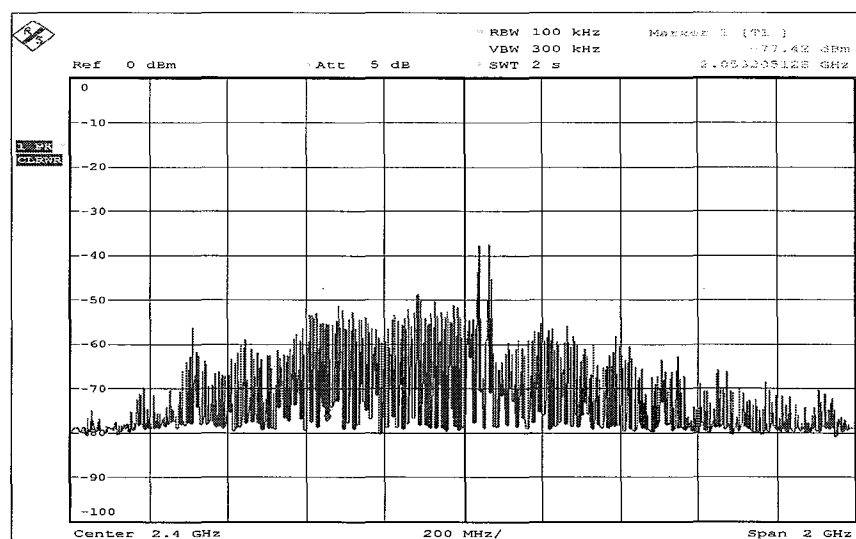


Figure 3.21 Spectre pour un espacement de 10 mm.

On distingue encore les raies correspondant à la bande 2.4 - 2.5 GHz du Wi-Fi et le bruit généré atteint un plafond de -50 dBm. À partir d'un espacement de 2.5 mm, le bruit subit une augmentation de 10 dB.

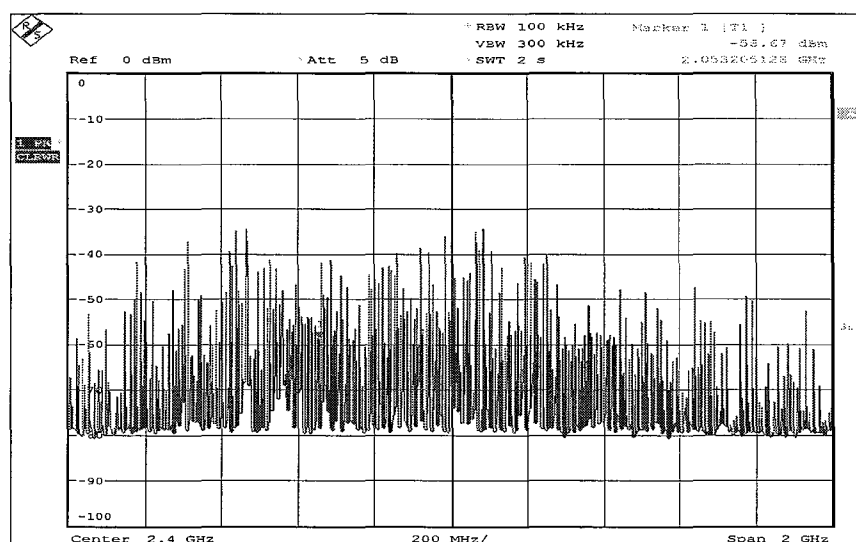


Figure 3.22 Spectre pour espacement de 2.5 mm.

À ce niveau d'espacement et de tension d'alimentation, les raies Wi-Fi sont totalement submergées par le bruit du Tesla-coil. On est donc en droit de s'interroger sur la qualité et la fiabilité d'une transmission Wi-Fi dans de telles conditions.

3.7 Conclusion

La méthode de mesure du bruit impulsionnel permet de capturer les signaux des ondes électromagnétiques des décharges partielles dans le domaine temporel. Grâce à un traitement du signal avec MATLAB, il est alors possible de calculer le spectre de chaque impulsion afin d'avoir une idée de la puissance du bruit émis. Il est également possible d'avoir une idée du taux de répétition de ces décharges afin de caractériser le canal de transmission pour une communication sans fil. L'étude à 2.4 GHz a permis, entre autre, de s'apercevoir qu'il existe une possibilité de perturber une communication à cette fréquence. Il faut s'intéresser aux technologies Wi-Fi actuelles pour savoir dans quelles proportions un échange de données peut s'effectuer dans des conditions acceptables.

CHAPITRE 4

Interprétation des résultats

4.1 Introduction

À présent que les mesures ont été effectuées en laboratoire, pour différents spécimens, pour différentes tensions d'alimentation, et pour différentes dimensions géométriques, un traitement et une interprétation des résultats sont de rigueur. Il incombe de savoir quelles mesures sont révélatrices quant aux éventuels problèmes que peuvent rencontrer les communications sans fil en présence des bruits générés. Ce chapitre s'intéresse aux paramètres qui sont à modifier pour perturber suffisamment une communication à 2.4 GHz. Il tente également d'expliquer en quoi la modification de ces paramètres influence les caractéristiques des ondes électromagnétiques. Les valeurs à faire varier sont : la tension d'alimentation des spécimens et l'espacement. Bien que les mesures n'aient pas été effectuées dans une chambre anéchoïque, on supposera que les conditions de propagation sont parfaites, c'est-à-dire sans réflexions. La puissance en dBm reçue par les appareils de mesures (oscilloscope et analyseur de spectre) est évaluée, ce qui permet entre autre de déduire une approximation de la puissance émise à la source, en considérant les atténuations dues aux câbles, à l'antenne et à la distance antenne-source. Un tableau final récapitule les bruits mesurés avec évaluation de la puissance à la source. Une première série de tests de performance réseau est effectuée à l'aide de deux ordinateurs reliés par Wi-Fi et un générateur de trafic. Les résultats sont présentés et rendent compte de l'influence du bruit de décharges partielles sur une communication sans fil au niveau du taux d'erreurs des paquets (PER), du débit et de la taille des trames échangées.

4.2 Influence de la tension d'alimentation sur le bruit

Les mesures effectuées au chapitre 3 montrent bien une relation entre la tension utilisée pour alimenter les spécimens de décharges partielles et le bruit enregistré. Pour les trois

spécimens : point-plan, électro-tronqué et le tesla-coil, on remarque que l'amplitude des ondes augmente avec la tension d'alimentation dans le domaine temporel.

Il faut à présent vérifier quelle influence la tension d'alimentation a sur l'amplitude spectrale des ondes de décharges partielles. Le graphe de la figure 4.1 superpose les spectres du bruit du spécimen électro-tronqué, pour une alimentation allant de 5 à 12 kV.

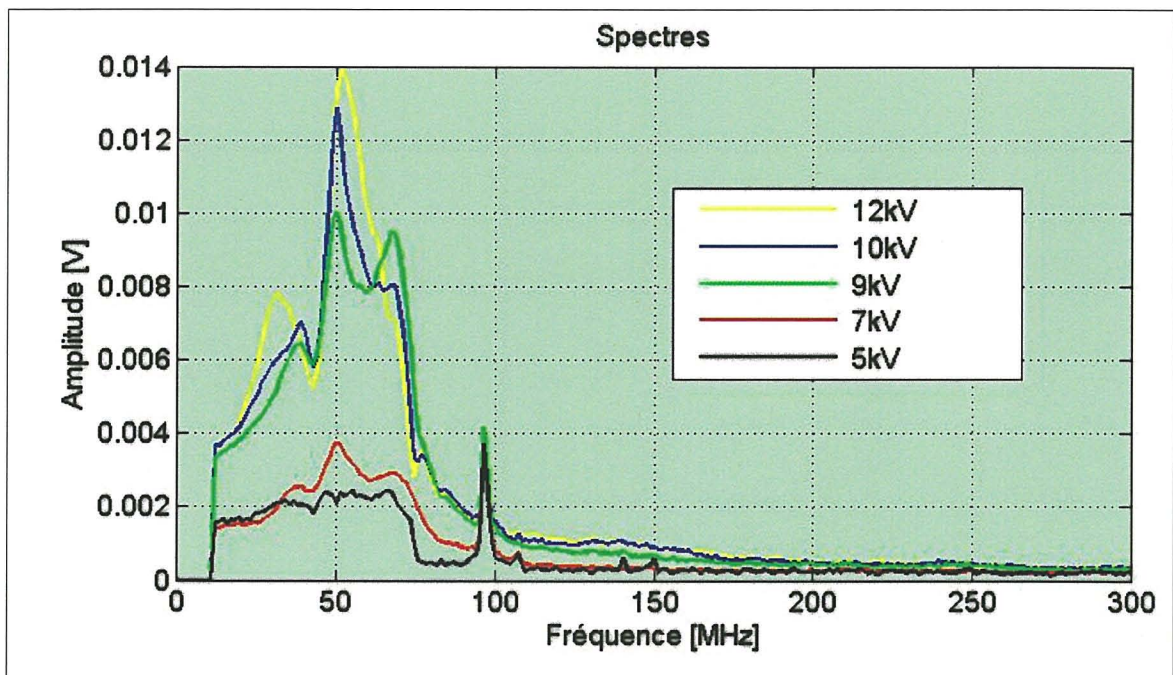


Figure 4.1 Superposition des spectres du bruit électro-tronqué pour différentes tensions d'alimentation.

Le pic à 100 MHz correspond aux ondes FM présentes dans le laboratoire. On remarque que pour toutes les tensions appliquées, l'amplitude de ce pic reste la même. Comme le spécimen a une alimentation plus élevée, le courant de décharge a une amplitude plus importante, donc l'onde électromagnétique aussi. Et si dans le domaine temporel, les ondes ont une plus forte amplitude, cela se remarque aussi sur le spectre fréquentiel, ce qui est en accord avec le classement des bruits impulsionnels pour le chapitre 1 (voir courbes 3D de l'annexe V). Pour faire le lien avec les postes de transport d'énergie, plus la tension d'alimentation d'un équipement est élevée, plus l'amplitude du bruit l'est également. On trouvera donc un bruit

plus fort dans les postes fonctionnant à 700 kV que dans celles à 100 kV. En revanche, pour tous les spécimens utilisés, aucune influence de la tension d'alimentation sur le contenu fréquentiel n'a été observée.

4.3 Influence de l'espacement inter-électrodes sur le bruit

La distance entre les électrodes peut avoir plusieurs conséquences sur le spectre du bruit. En considérant le rôle inductif et capacitif des électrodes, faire varier la distance entre elles revient à faire varier la valeur de son impédance. Le courant de décharge subit lui aussi des changements, ce qui modifie également l'onde électromagnétique. Il faut donc analyser l'influence de l'espacement sur l'amplitude spectrale d'une part et sur la fréquence moyenne d'autre part.

4.3.1 Influence de l'espacement sur l'amplitude spectrale

Tel que décrit au chapitre 3, plus l'espacement entre les électrodes est rétréci, plus l'amplitude spectrale augmente. Il serait intéressant d'utiliser les mesures prises en domaine temporel afin de mieux constater l'influence des impulsions. Comme pour les mesures au CTT, l'oscilloscope TDS6124C est utilisé avec l'option FastFrame, et configuré pour enregistrer 100 impulsions. À partir des enregistrements, le programme MATLAB calcule le spectre moyen pour chaque espacement, à partir des 100 enregistrements.

Les mesures sont effectuées dans les mêmes conditions que pour l'étude à 2.4 GHz : filtre passe-haut à 1800 MHz, amplificateur LNA à 25 dB à 2.4 GHz. Pour chaque espacement, le spectre est calculé et la figure 4.2 superpose les raies afin de constater son influence sur l'amplitude.

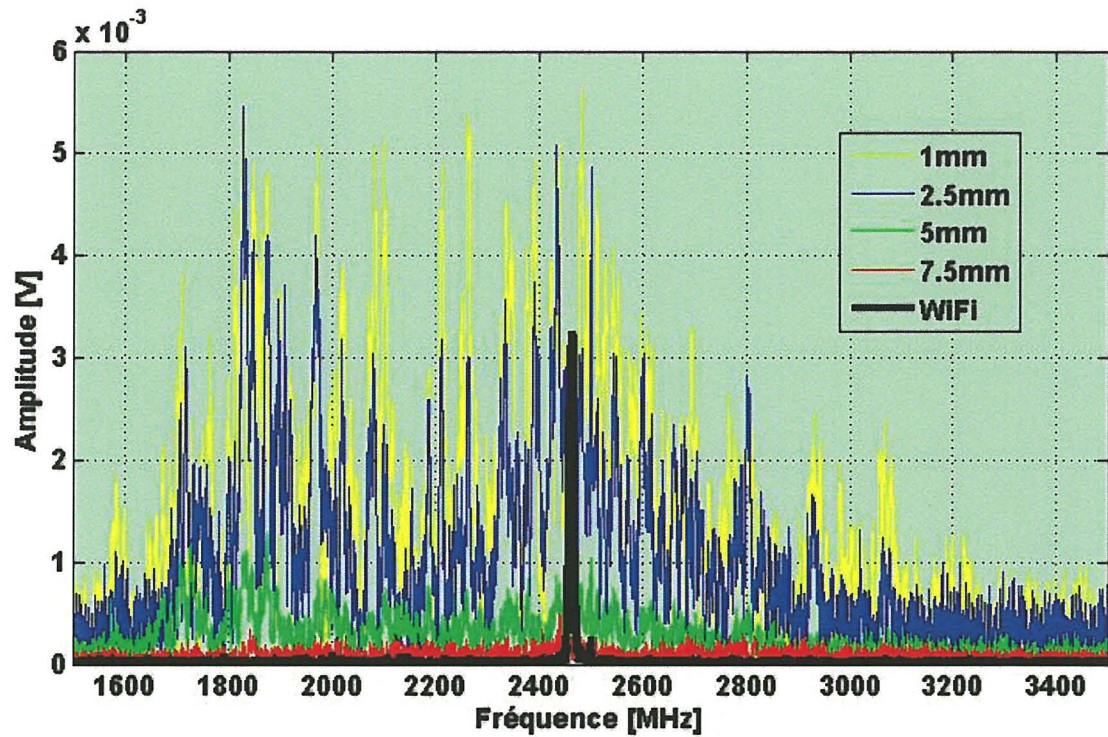


Figure 4.2 Superposition des spectres du tesla-coil pour un espacement allant de 7.5 mm à 1 mm.

Une première remarque est à apporter sur le pic entre 1500 et 1900 MHz : il s'agit en fait de la fréquence de coupure du filtre passe-haut 1800 MHz, comme il figure sur l'annexe VIII. On remarque également que les résultats sont en accord avec ceux fournis par l'analyseur de spectre : plus l'espacement diminue et plus le bruit augmente en amplitude, ce qui peut être également interprété par une augmentation de la fréquence de modulation de l'onde de décharge partielle. En effet, Si l'on fait la comparaison du signal d'une décharge partielle à celui d'un signal quelconque modulé à une fréquence porteuse f_p , plus la distance entre les électrodes diminue et plus f_p augmente.

La raie du Wi-Fi se voit dominée par le bruit du tesla-coil pour un espacement inférieur ou égal à 2.5 mm. Il serait donc intéressant de tester les performances de communication pour un espacement de cet ordre.

4.3.2 Influence de l'espacement sur la fréquence moyenne

Pour la même tension d'alimentation, l'électrode flottante est rapprochée de la pointe du tesla-coil. On prend les espacements suivants : 5 mm, 3.5 mm et 2 mm. La difficulté de cette mesure est de capturer les ondes provenant de l'arc électrique et non celles produites par le circuit du tesla-coil. Pour cela, le déclencheur est fixé pour les maxima des formes d'ondes visualisées. La fréquence moyenne est calculée mathématiquement en utilisant l'amplitude spectrale comme masse barycentrique. Pour N points du spectre avec les fréquences f_i et les amplitudes S_i , la fréquence moyenne est calculée ainsi :

$$f_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^N (f_i \times S_i)}{\sum_{j=1}^N S_j} \quad (4.1)$$

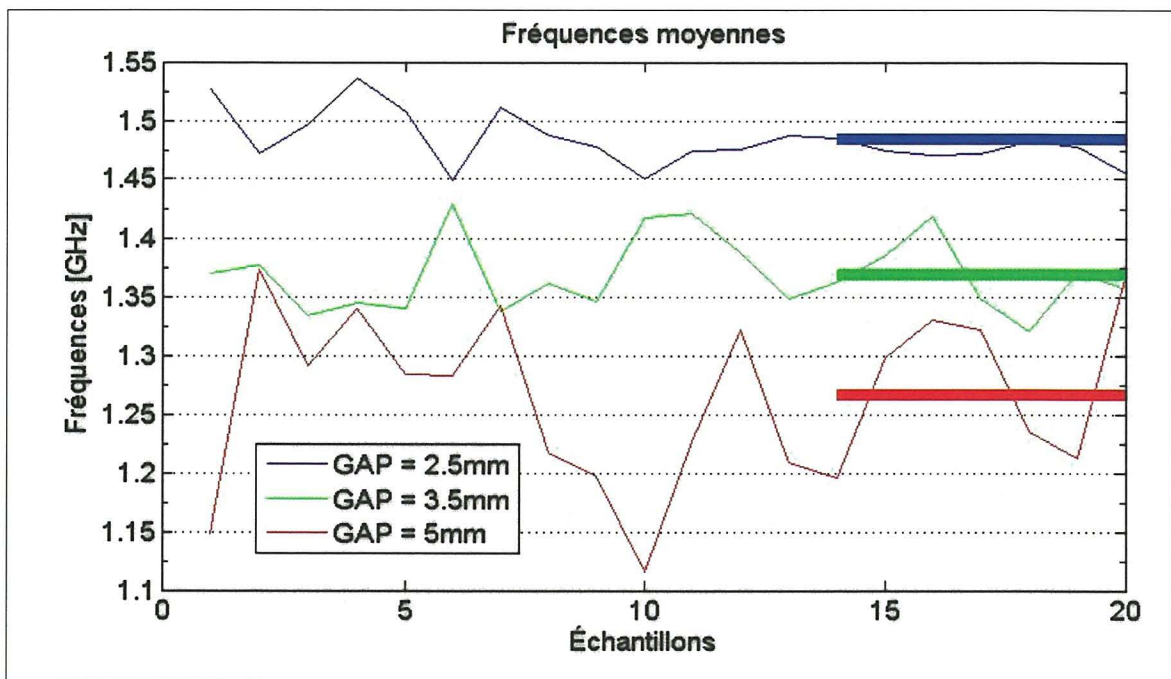


Figure 4.3 Influence de l'espacement sur la fréquence moyenne.

On observe bien que plus l'espacement est petit et plus la fréquence moyenne augmente.

L'onde électromagnétique créée est dérivée du courant de décharge. On peut représenter le spécimen par un montage LC série, avec la fréquence de résonance valant $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

L'espacement agit directement sur la capacité, car il s'agit de la distance entre les électrodes.

Pour une capacité usuelle (avec deux électrodes plates), $C = \varepsilon \frac{S}{l}$, avec S la surface des électrodes, et l l'espacement. Dans le cas du tesla-coil, l'influence de la surface S de l'aiguille dépend de l'espacement. On a alors $C = \varepsilon \frac{S(l)}{l}$. Plus l'espacement est petit et plus la surface d'influence est petite, donc la capacité est petite, ce qui augmente la fréquence de résonance.

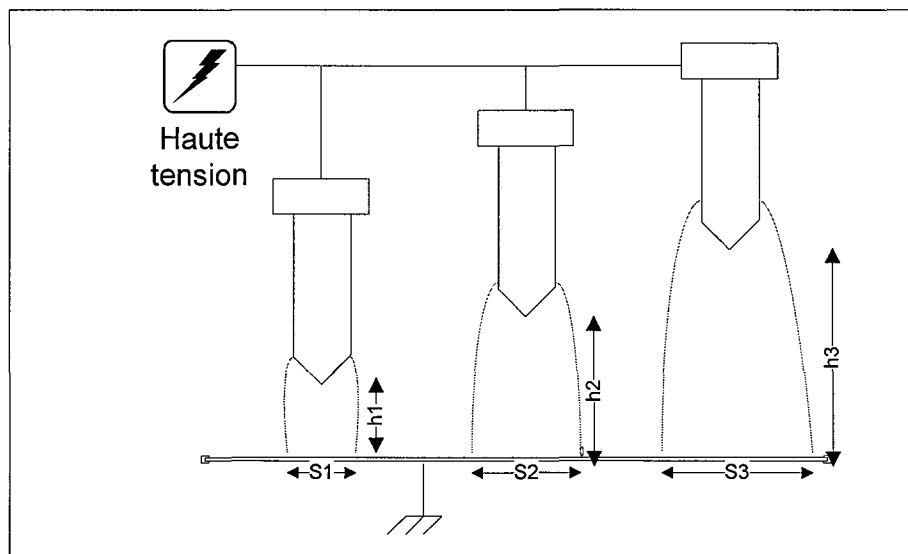


Figure 4.4 Influence de l'espacement sur la surface d'électrode.

4.4 Bruits et communications

En considérant les mesures qui ont été effectuées pour différents paramètres de modélisation : spécimen, espacement, tension d'alimentation, il est à présent temps de s'interroger sur l'impact du bruit de décharge partielle sur une communication sans fil.

Une partie des mesures précédentes a été centrée autour de la fréquence 2.4 GHz qui est celle de nombreuses communications sans fils (Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth..), comme l'indique le premier chapitre.

D'après la figure 4.2, la fréquence du Wi-Fi a une amplitude plus faible que celles du bruit du tesla-coil pour une tension d'alimentation de 56 kV et pour un espacement plus petit que 2.5 mm. On est donc en droit de penser que pour ces paramètres, une communication sans fil peut être perturbée, voire interrompue.

Afin d'avoir une idée de l'influence que peut avoir le bruit des décharges partielles sur un réseau sans fil, le tableau 1 regroupe les différents débits de communication Wi-Fi et la sensibilité à la réception en dBm pour la société D-Link (http://datasheets.tracor.org/DLINK/DLINK_WIFI_AP-XtrG_DWL-2100AP.pdf) :

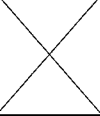
Tableau 4.1 Classement des sensibilités de réception Wi-Fi chez D-Link

Débit [Mb/s]	2	9	11	12	18	24	36	48	54
Sensibilité à la réception (dBm)	-89	-86	-83	-85	-83	-80	-76	-71	-66

Rappelons que pour les espacements choisis, le bruit est compris entre -50 et -40 dBm autour de 2.4 GHz, avec une amplification de 25 dB, ce qui correspond en fait à un bruit compris entre -75 et -65 dBm. Les sensibilités de tous les récepteurs du tableau sont atteintes, donc il est possible que ces derniers soient perturbés par le bruit du tesla-coil.

Le tableau 4.2 récapitule tous les bruits mesurés durant ce projet de recherche.

Tableau 4.2 Classement des résultats

Specimens	Parametres		Caractéristiques du bruit		Niveau de bruit à la source [dBm]	Distance
	Tension d'alimentation [kV]	Gap [mm]	Fréquences [MHz]	Niveau de bruit mesuré [dBm]		
Électro-tronqué	7		35-70	-27	-29	1m
	9		35-70	-17	-19	1m
	10		35-70	-15	-17	1m
	12		35-70	-13	-15	1m
Point-plan	7	30	25	-37	-39	1m
Tesla-coil	36	7,5	2400	-84	-22	10m
	-	5	2400	-68	-6	10m
	-	2,5	2400	-62	0	10m
	47	7,5	2400	-72	-10	10m
	-	5	2400	-66	-4	10m
	-	2,5	2400	-60	2	10m
	56	inf	500-1500	-53	1	10m
	-	7,5	500-1500	-44	10	10m
	-	7,5	2400	-72	-10	10m
	-	5	2400	-65	-3	10m
	-	2,5	2400	-60	2	10m

Les résultats sur le tableau de classements sont approximatif. Les puissances mesurées ont été calculées à partir des spectres recueillis et des caractéristiques des antennes utilisées. Pour l'évaluation du bruit à la source, la formule d'atténuation en espace libre a été utilisée (annexe VI) afin d'évaluer les pertes dues à la distance antenne-source. Les niveaux de bruit mesurés correspondent aux valeurs des spectres calculés à partir des formes d'ondes. Les bruits du tesla-coil ont été mesurés avec une antenne Wi-Fi à une distance de 10m ; on est donc en droit de supposer qu'un équipement d'une poste fonctionnant à 50 kV et ayant des prédispositions à générer des décharges partielles a des chances de perturber une communication. Néanmoins, rappelons que les décharges ne se produisent pas continuellement et que leur durée est d'environ 400 ns. Elles deviennent gênantes à partir du moment où elles surviennent avec un fort taux de répétition, ce qui peut se produire s'il y a un grand nombre de sources de décharges dans le voisinage de la communication.

Un lien est à faire entre les bruits classés et la sensibilité des récepteurs Wi-Fi. Même si la puissance relevée est supérieure à la sensibilité de quelques dizaines de dB, la communication peut être établie mais présentera sûrement quelques dégradations de qualité : débit, taux d'erreurs, ...etc. Pour évaluer les performances, un test avec deux ordinateurs portables parasités avec le tesla-coil fait le bilan des trames échangées entre un émetteur et un récepteur. Un générateur de trafic est utilisé pour configurer les échanges de trames selon différentes tailles, différents débits et pour les protocoles UDP et TCP. Le tesla-coil est placé à proximité du récepteur et l'émetteur est éloigné à 20 m.

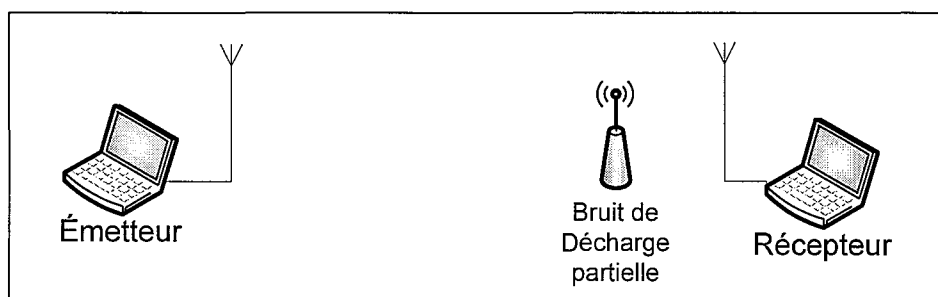


Figure 4.5 Dispositif de test de performance.

Le bruit généré par le tesla-coil, s'il est trop près, engendre un mauvais fonctionnement du routeur qui alors redémarre fréquemment, interrompant ainsi la communication. À défaut d'avoir des ordinateurs plus robustes, le tesla-coil est placé à au moins 1m du récepteur. Après plusieurs simulations lancées pour une puissance de 10 mW (10 dBm), il s'avère que le tesla-coil n'a aucune influence sur la communication : le taux d'erreurs de bits ne change pas par rapport à une communication sans bruit et le débit ne diminue pas de façon significative. Il ne faut tout de même pas oublier que le tesla-coil délivre une tension de 50 kV et qu'il est l'unique source de bruit. Dans un poste de transport d'énergie, la tension véhiculée est de 700 kV et les sources sont multiples. On peut donc supposer que dans des conditions plus réalistes, la communication rencontrera des difficultés, sans pour autant être interrompue.

Pour la prochaine expérience, le signal d'émission est diminué afin d'avoir un rapport signal sur bruit (SNR) beaucoup plus faible.

Deux protocoles de communication sont testés :

- UDP (User Datagram Protocol) : les trames sont envoyées de l'émetteur vers le récepteur sans vérification d'erreurs.
- TCP (Transmission Control Protocol) : les trames sont envoyées avec accusé-réception.

Paramètres de l'expérience :

Puissance d'émission du routeur Wi-Fi : 0.1 mW (-10 dBm)

Distance émetteur – récepteur : 25m

Distance récepteur – tesla-coil : 1m

Générateur de trafic : J-Perf (Annexe)

Tesla-coil 54 kV avec espacement = 2.5 mm

Protocole UDP :

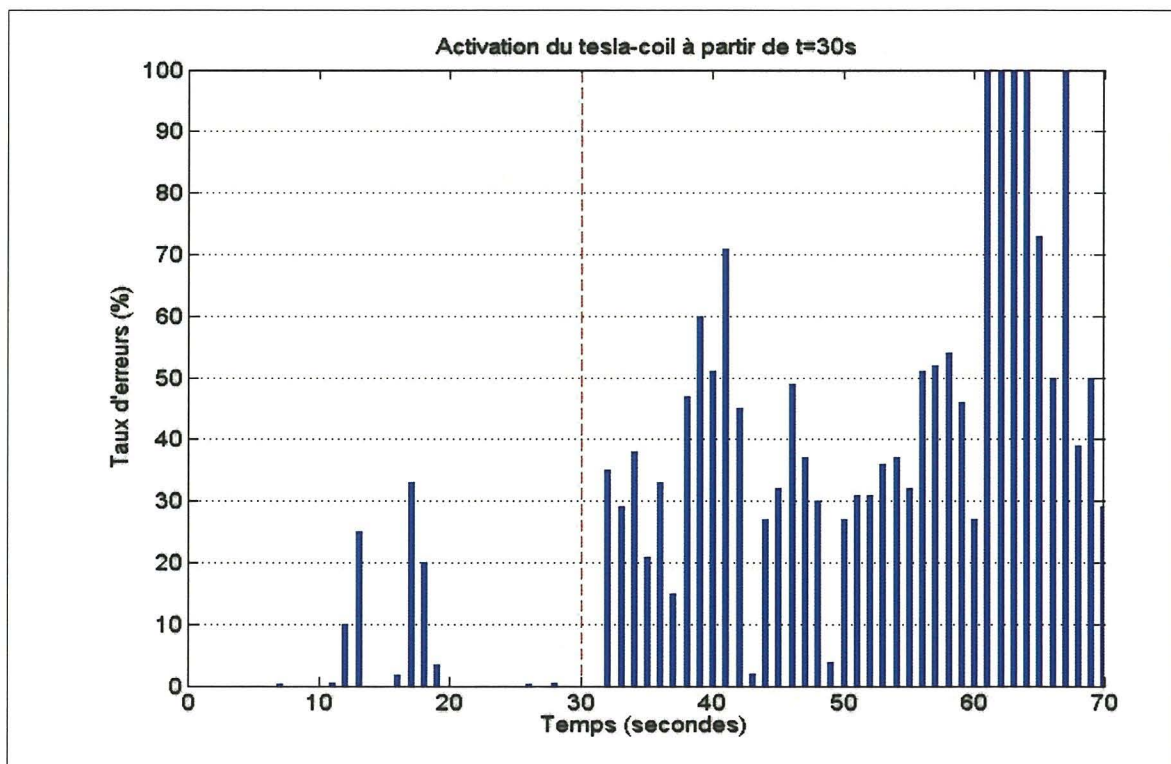


Figure 4.6 Résultats du test de performances, protocole UDP, 1 minute de durée de simulation.

Le taux d'erreurs correspond au nombre de paquets reçus sur le nombre de paquets pour chaque seconde. À la figure 4.6, il apparaît bien que dès l'activation du tesla-coil (ligne rouge), la communication est fortement perturbée.

Protocole TCP :

Comme pour le test avec le protocole UDP, le tesla-coil est activé au milieu de la simulation afin de mieux constater son influence sur les performances de transfert de trames. Les résultats sur le débit effectif sont illustrés sur la figure 4.7.

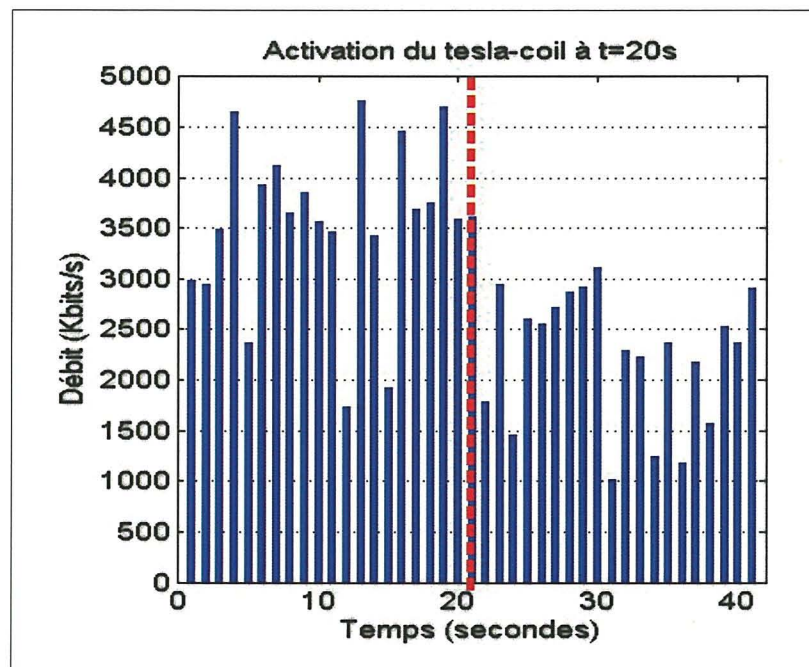


Figure 4.7 Débit à la réception avec le protocole TCP.

Même si après l'activation du tesla-coil la chute du débit n'est pas aussi significative que pour le protocole UDP, elle reste quand même non négligeable. La figure 4.8 montre un comportement similaire pour la taille des trames échangées.

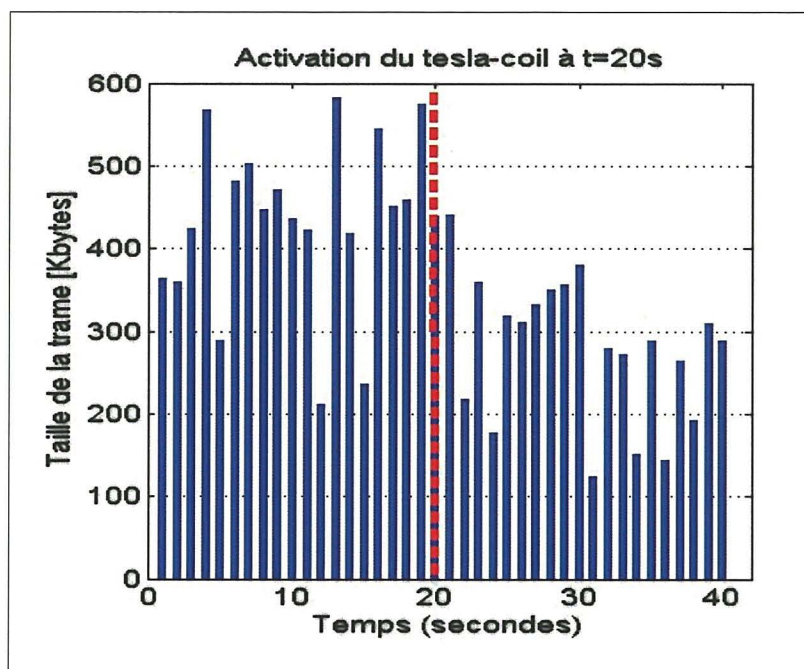


Figure 4.8 Taille des trames reçues avec le protocole TCP.

On remarque bien qu'à partir de la mise en fonctionnement du Tesla-coil, le débit rencontre une baisse moyenne de 1 Mb/s et que les trames échangées ont leurs tailles diminuées de 100 Kbytes.

4.5 Conclusion

Les expériences effectuées révèlent plusieurs informations quant aux possibilités d'une communication sans fil à 2.4 GHz dans un milieu hautes tensions. Premièrement le bruit de décharge partielle devient plus gênant pour une communication pour une tension d'alimentation plus élevée et pour une distance entre les conducteurs métalliques plus petite. Le couple de paramètres problématiques pour ces expériences est un espacement de 2.5 mm et une tension de 54 kV. Pour des tensions plus élevées (100, 400, 700 kV), il est possible qu'un espacement plus grand offre des caractéristiques de bruit similaires (puissance et fréquence moyenne).

Pour tout type de décharges partielles, le processus principal est de fournir un fort potentiel électrique à un conducteur placé en face d'une électrode flottante, donc un potentiel plus élevé permet une avalanche d'électrons sur une plus grande distance (espacement plus grand).

Pour établir une communication, les tests de performances permettent d'affirmer que le protocole TCP est préférable à l'UDP en termes de fiabilité. En effet, pour une communication fixée à 5 Mb/s, une chute de 1 Mb/s de débit est préférable à un taux d'erreurs des paquets variant de 50 à 100 %. Néanmoins, il serait plus rigoureux de refaire ces expériences dans un milieu soumis à de plus hautes tensions (100- 700 kV).

CONCLUSION

Devant la nécessité d'installer un réseau sans fil de capteurs dans un poste de transport d'énergie, les premiers résultats indiquent que le projet est amplement réalisable, à condition de connaître l'environnement dans lequel ces senseurs doivent être installés. Il convient de dire que le bruit ambiant n'est pas un problème pour les communications sans fil utilisées actuellement, vu sa bande fréquentielle (DC-300 MHz). En revanche le bruit impulsionnel peut s'avérer plus préoccupant.

Avec des décharges partielles de tous types (internes, externes et couronne) qui peuvent survenir sur une multitude d'équipements comme les transformateurs, les isolateurs de traverses, les lignes hautes-tensions, ou les jeux de barres, la qualité des communications sans fil se trouve menacée. Ces bruits, qui couvrent une largeur de bande allant du DC à 10 GHz, ont une puissance comprise entre 30 dBm et -50 dBm pour les bandes respectives DC-100 MHz, et 1 GHz-10 GHz. Selon la tension véhiculée et la nature des actions entraînant la création de décharges partielles, le niveau de bruit gagnera en puissance et la génération des décharges deviendra imprévisible. Un petit nombre de décharges n'empêcheront pas le transfert de données, mais une succession de plusieurs rafales peut dégrader la communication, voire la bloquer pour une durée indéterminée.

Les expériences effectuées permettent d'affirmer plusieurs points. La mesure du bruit impulsionnel nécessite d'être prise dans le domaine temporel afin de connaître avec exactitude le contenu spectral de chaque impulsion. La mesure temporelle permet aussi d'avoir une approximation du taux de répétition des décharges, ce qui peut être utile pour modéliser le canal de transmission. Concernant les paramètres des expériences, plus la tension d'alimentation est élevée et plus le bruit gagne en puissance. De même, plus les défauts de type couronne sont grands (c'est-à-dire l'espacement entre deux conducteurs sous tension est petit), et plus les interférences se déplaceront vers les très hautes fréquences. Les décharges en elles mêmes ne sont pas le problème majeur, car leur durée est très courte. C'est en fait le taux de répétition qui donne de l'importance aux caractéristiques du bruit. Vu que

les décharges sont créées aux extrema des cycles positifs et négatifs de la tension d'alimentation de 60 Hz, plus cette tension est élevée et plus le potentiel à atteindre pour générer la première décharge se présente rapidement. La fenêtre temporelle devient donc plus large pour générer ces décharges.

Les interférences sur les postes de transport d'énergie peuvent être problématiques pour une tension d'alimentation de plusieurs centaines de kV, encore faudrait-il effectuer des mesures et des tests de performance dans ces conditions afin d'en être sûr, c'est-à-dire dans un laboratoire hautes tensions ou dans un poste. Plusieurs paramètres interviennent pour influencer la propagation du bruit : les conditions de températures et de pressions de l'air, la tension d'alimentation, les dimensions géométriques des équipements, et surtout les opérations humaines (court-circuit, manipulation des sectionneurs). Une simulation purement logicielle serait donc insuffisante pour estimer les performances d'une communication sans fil dans un tel environnement, à moins qu'elle ne prenne en compte tous les paramètres mentionnés.

Des applications de réseaux sans fil dans des milieux similaires ont été réalisées avec succès : réseau Bluetooth sur un poste, réseau ZigBee maillé sur un bateau de BP...etc. Les modifications à apporter sont au niveau de la disposition des capteurs et de la technologie à employer pour transmettre et recevoir les données suivant les caractéristiques des bruits présents : amplitude, fréquence et apparition des décharges. Ce projet a permis de mettre en place une méthodologie de mesure des ondes de bruit impulsionnel et une méthode d'analyse du taux de répétition. Une première approche pratique serait d'aller dans un poste de transport d'énergie et de mesurer, aux endroits où les capteurs doivent être installés, le bruit électromagnétique impulsionnel avec estimation du taux de répétition. Il serait ainsi possible d'estimer le spectre réel à un endroit précis et de tester une communication sans fil soit en laboratoire et dans les mêmes conditions ou soit à l'endroit même. Pour être fidèles aux applications futures, les tests de performances doivent tenir compte de la rapidité de l'échange d'informations, de la taille des messages et de la précision voulue pour interagir avec le poste. Tous ces critères dépendent de l'exigence de l'utilisateur, et plus précisément

des équipements contrôlés, des manipulations en cours et de la consommation d'énergie en aval de la chaîne de distribution et de transport.

Pour protéger la communication des interférences générées par les équipements, plusieurs solutions sont disponibles. Une première solution serait d'éloigner les capteurs des endroits trop bruités, ce qui permettrait d'atténuer quelque peu la puissance du bruit. Une deuxième action approche serait d'isoler l'équipement à l'origine des décharges à l'aide d'un blindage de type cage de Faraday. Le réseau serait orienté de façon maillée ou ad-hoc, à condition de connaître le patron de propagation du bruit afin de s'assurer qu'il ne perturbe le canal de transmission entre les nœuds dans des conditions acceptables.

RECOMMANDATIONS

Cette proposition de série de mesures a pour but d'évaluer l'influence d'un plus haut voltage sur la génération de décharges partielles. Avec les spécimens du CTT (électro-tronqué, point-plan), le voltage d'alimentation ne dépasse pas 15 kV, et on observe les premières décharges à partir de 5-7 kV. On est donc en droit de supposer qu'il existe des seuils de tensions générant des décharges. Comme les postes de transport d'énergie sont alimentées entre 100 et 735 kV au Québec, il est nécessaire de voir les caractéristiques du bruit électromagnétique dans cette gamme de tensions. Certains laboratoires de l'IREQ sont équipés d'alimentation pouvant aller jusqu'à 100, voire 200 kV. Avec des spécimens adaptés, un autre genre de décharges partielles est à prévoir : amplitude et fréquence plus élevées, durée de l'impulsion plus ou moins différente, taux de répétition des décharges plus grand. La méthodologie de mesure reste la même, mais cette fois ci, des atténuateurs seront surement de rigueur pour protéger l'oscilloscope.

Spécimens 100-200 kV

Les spécimens précédents ne sont pas conçus pour résister à une tension d'alimentation de l'ordre de 100 kV. Il en résulterait une détérioration instantanée ou prolongée des matériaux. C'est pourquoi il est primordial d'utiliser des montages d'une catégorie supérieure qui peuvent supporter de très hautes tensions. Deux spécimens reviennent dans les articles de la revue de littérature : le parafoudre et l'isolateur de traverse (figure 4.9). Mis sous une tension de 100 kV, ces équipements produisent un bruit électromagnétique de la famille des décharges partielles : les décharges de surface et le bruit couronne.

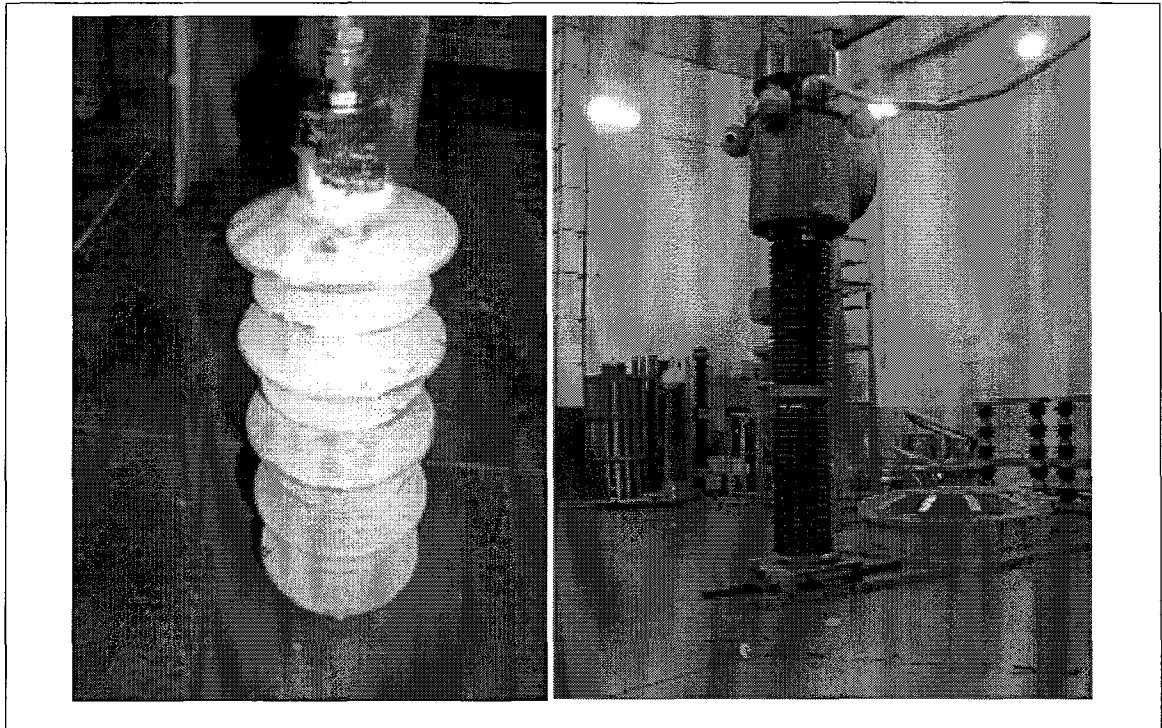


Figure 4.9 Parafoudre (gauche) et isolateur de traverse (droite).
Tirées de K.L Wong, 2006, [23] et Hédio Tatizawa, 2008 ^[24]

Les branchements électriques sont identiques à ceux des spécimens précédents : il suffit de créer une très grande différence de potentiel entre les bornes. Une extrémité est alors reliée au générateur de tension et l'autre à la masse.

Test de performance Wi-Fi entre deux ordinateurs portables

Ayant connaissance de comment le bruit doit être généré pour avoir les conditions de communications les plus mauvaises possibles, il faudrait évaluer les pertes de trames lors d'une communication entre deux capteurs. Pour cela, plusieurs générateurs de trafic sont à disposition pour envoyer des paquets de différentes tailles et à différents débits pour plusieurs types de protocoles. C'est le cas de D-ITG et J-Perf (<http://iperf.fr/>).

Voici la méthode à suivre :

Il faut configurer une liaison Wi-Fi entre deux ordinateurs portables à l'aide d'un routeur. Grâce aux logiciels nommés précédemment, un ordinateur prend le rôle de l'émetteur l'autre celui du récepteur (serveur-client).

Trois scénarios sont à envisager. La source de bruit est placée à :

- 1m de l'émetteur
- 1m du récepteur
- Mi-chemin entre les deux ordinateurs

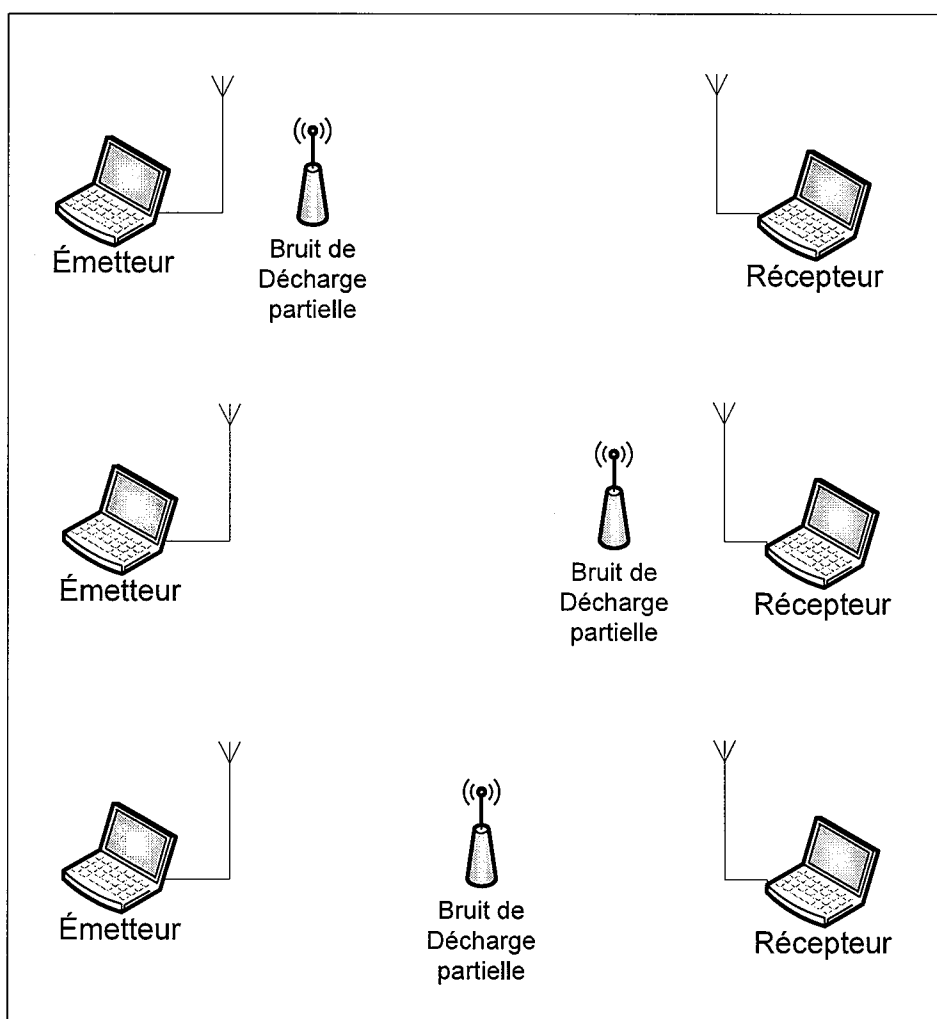


Figure 4.10 Montages de test de performance avec deux ordinateurs portables.

Une fois la connexion établie, il suffit de rentrer les paramètres de communications à le poste émettrice : taille des paquets, débit, adresse IP du destinataire, protocole (UDP, TCP...).

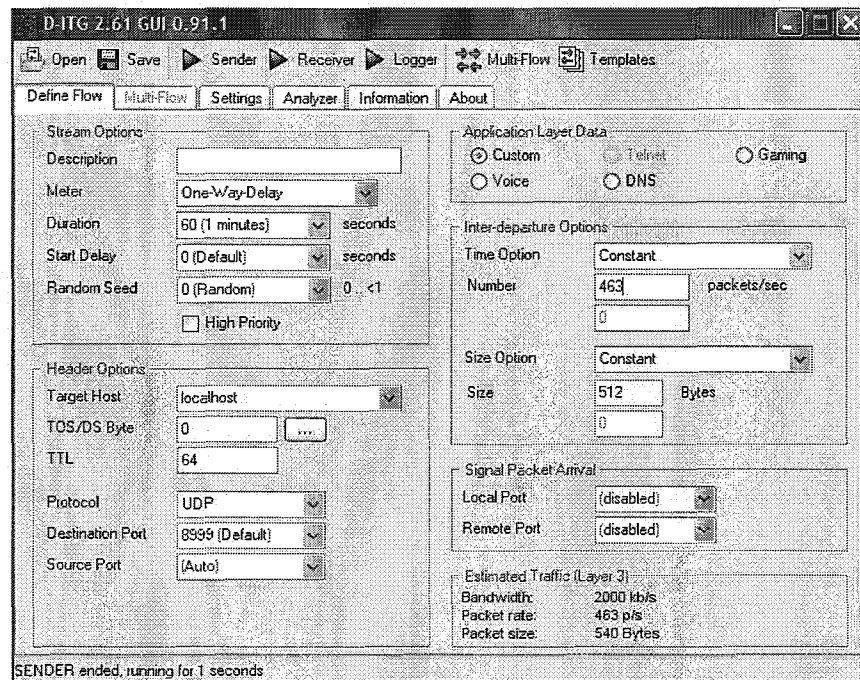


Figure 4.11 Capture de l'interface D-ITG.

Pour avoir une idée des performances, il faut que le transfert de communication soit d'au moins 1 minute. La station réceptrice renseigne sur combien de paquets ont été perdus durant la transmission, et avec quel débit pour chaque seconde.

Ce test permet d'avoir une approche réaliste des conditions de communication dans les postes de transport d'énergie. Pour plus de fidélité quant aux dispositions des équipements dans les postes et de la nature du bruit, il faudrait disposer de plusieurs sources de bruits autour de l'équipement à tester. On pourrait utiliser un isolateur de traverse (bushing), un spécimen point-plan et un parafoudre à proximité d'un capteur et amorcer la simulation décrite précédemment.

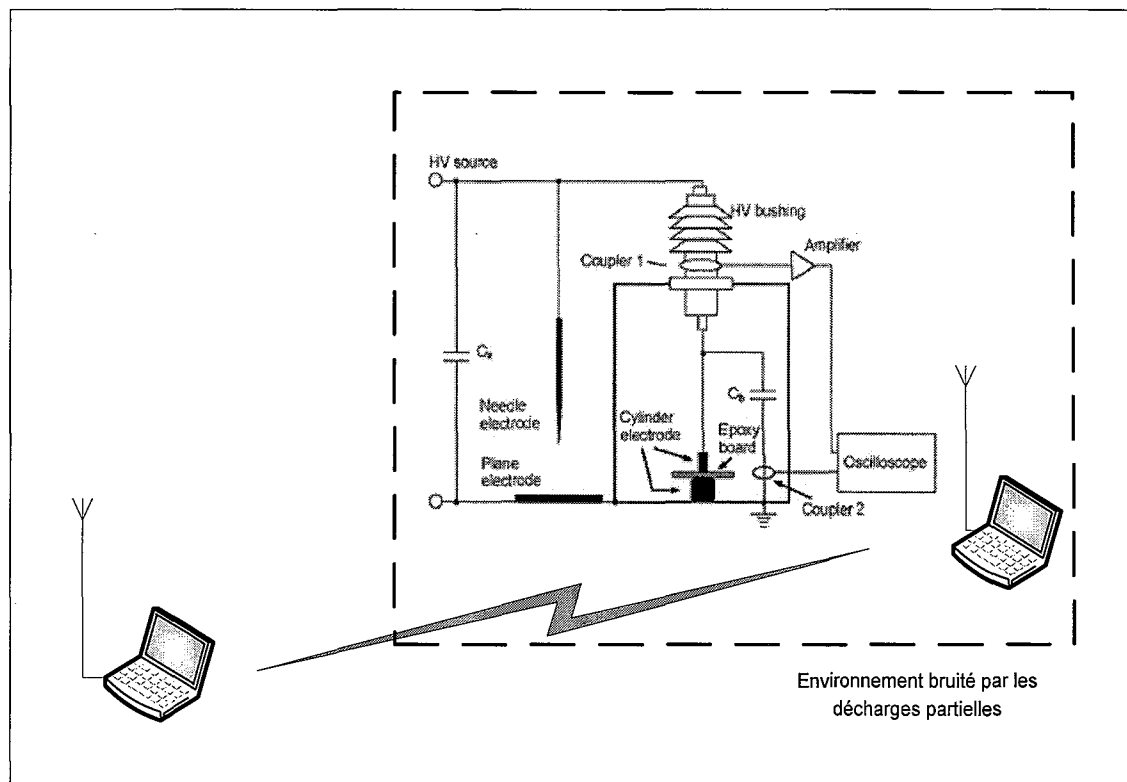


Figure 4.12 Test de performance en milieu hautes-tensions.

Adaptée de Jian Li, 2006 ^[22]

La puissance du signal reçue étant plus faible à cause des atténuations dues à la propagation des ondes dans l'air, il est prévisible que les plus mauvais résultats de communication seront obtenus lorsque le récepteur est bruité. La puissance du signal reçue sera plus faible face au bruit généré et on s'attendra donc à avoir un rapport signal sur bruit (SNR) plus faible que dans les autres scénarios. Pour tester les performances de communication sans générateur de trafic, une autre méthode consiste à faire du « streaming » vidéo entre deux ordinateurs. Le logiciel VLC (www.videolan.org/vlc/) permet une telle application. Pour jouer sur le débit il suffit d'encoder les vidéos suivant différentes tailles.

Nouvelle méthode pour l'estimation du taux de répétition des décharges partielles

L'oscilloscope TDS7000C, possède les mêmes fonctions que celui utilisé pour ce mémoire (TDS6124C) avec des améliorations. L'option FastFrame permet désormais d'exporter les étiquettes temporelles de chaque enregistrement, ce qui permettrait de reconstituer le signal réel de la génération des décharges à partir d'un programme de traitement du signal.

ANNEXE I

Sonde simulatrice du bruit gap

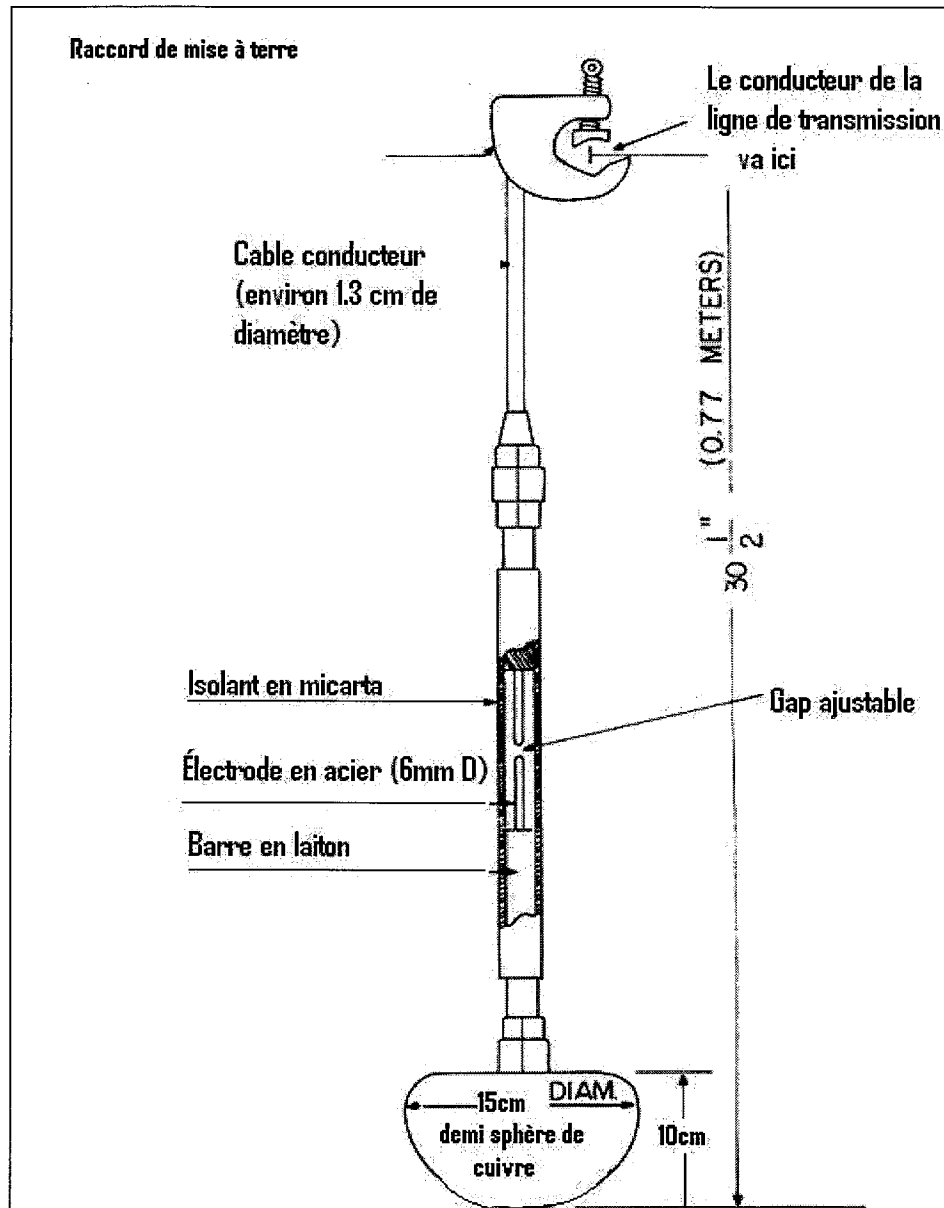


Figure-A I-1
Adaptée de W.E Pakala, 1971 ^[10]

ANNEXE II

Spectres des isolateurs de traverse (bushing)

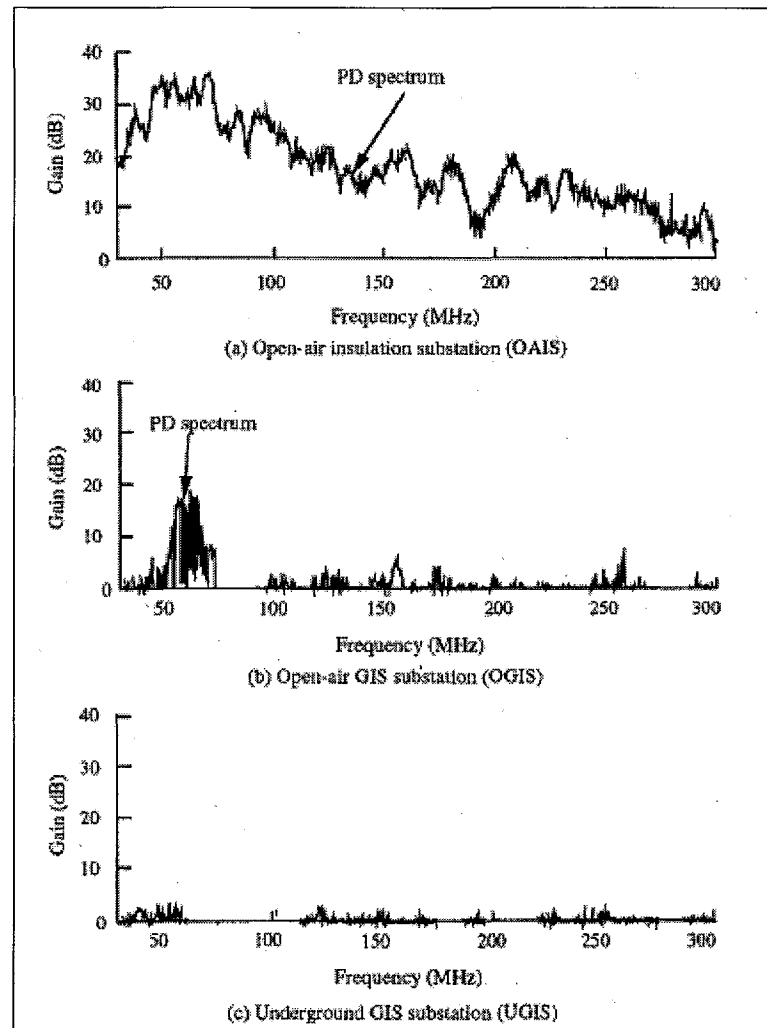


Figure-A II-1
Tirée de M. Hikita, 1998 ^[6]

ANNEXE IV

Graphe 3D du bruit ambiant

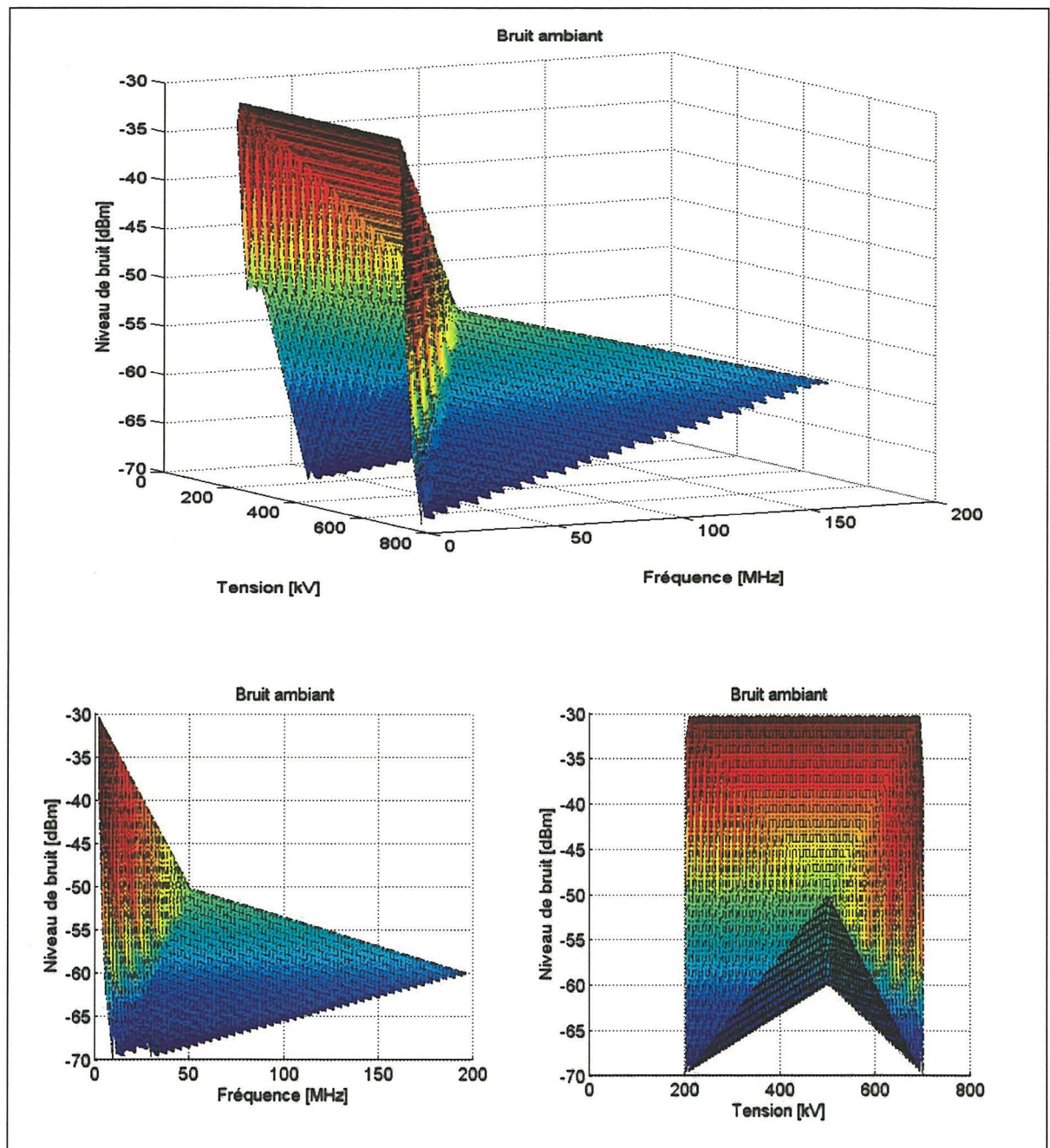


Figure-A IV-1

ANNEXE V

Graphe 3D du bruit impulsionnel

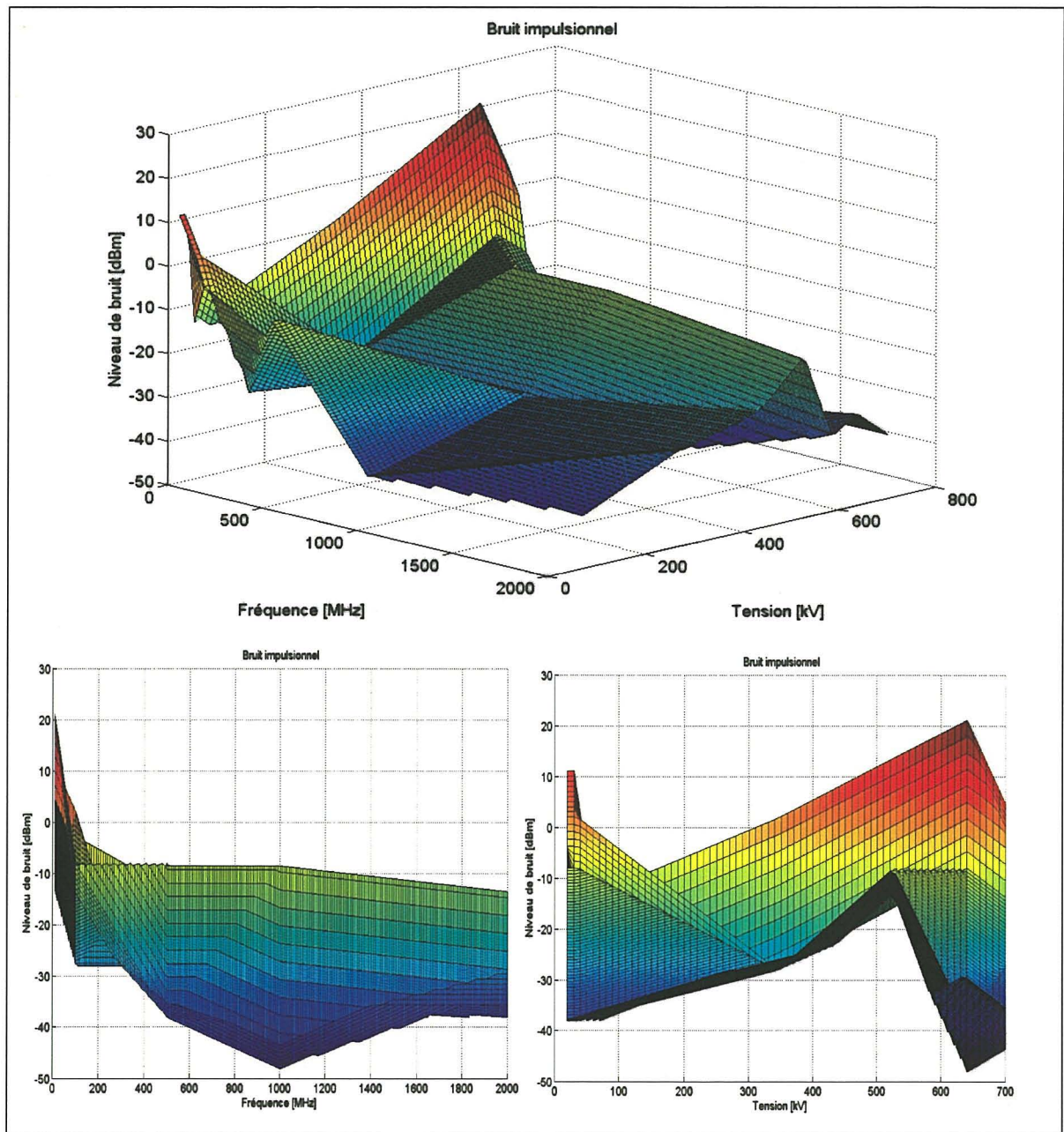


Figure-A V-1

ANNEXE VI

Harmonisation des unités de mesure

Dans les différents articles consultés, les auteurs n'étalonnent leurs équipements de la même façon. Il est donc important, pour comparer les bruits recensés, d'utiliser la même unité de bruit électromagnétique, à savoir le dBm.

M.Pakala utilise au gré des circonstances le dB/ μ V/m ou le dB/ μ V/m/MHz ou le dB/ μ V.

M.Thomas quant à lui s'intéresse au bruit émanant du courant électrique ; l'unité utilisée est l'A/Hz.

Voici les équations permettant la conversion de ces gains en dBm :

$$AF_{dB/m} = 20 \log(f_{MHz}) - G_i - 29.78$$

$$P_{dBm} = P_{dB\mu V/m} + G_i - 20 \log(f_{Hz}) + 42.79$$

$$P_{dBm} = P_{dB\mu V} - 107$$

$$P_{dB\mu V/m} = P_{dB\mu V} + AF_{dB} + att_{dB}$$

$$P_{antenne}(dB) = P_{oscillo}(dB) - G_i(dBi) - Att_{cable}(dB)$$

$$Pertes_{dis tan ce}(dB) = -20 \log(dis tan ce[m]) + 21.98 - 20 \log\left(\frac{C}{f[Hz]}\right)$$

ANNEXE VII

Option FastFrame de l'oscilloscope TDS6124C

L'option FastFrame combine plusieurs enregistrements en un seul.

À chaque enregistrement fait à partir du trigger, l'oscilloscope va coller les unes à la suite des autres les fenêtres temporelles avec les formes d'ondes qu'elles contiennent.

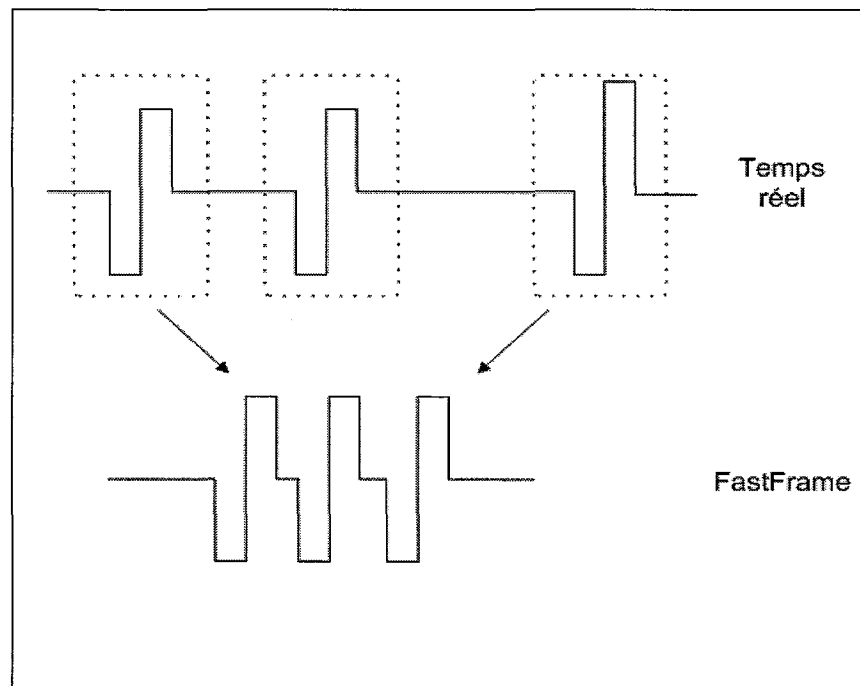


Figure-A VII-1

Cette option de l'oscilloscope TDS6124C permet d'enregistrer plusieurs centaines d'impulsions et de projeter ainsi une étude statistique sur les amplitudes et les fréquences des signaux.

L'utilisateur peut consulter sur l'oscilloscope la durée réelle entre n'importe quelles impulsions. Le taux de répétition des décharges peut être ainsi calculé en connaissant la durée d'une rafale de 100 impulsions ou plus.

L'oscilloscope TDS6124C a une capacité d'enregistrement de 64 Méga-échantillons. Si l'on fixe la longueur d'une fenêtre à 5000 échantillons, on peut enregistrer 12800 impulsions au maximum.

Cette option est limitée par le temps de traitement de l'information : pour une configuration 5000 échantillons à 2.5 GS/s, à savoir une fenêtre de 2 μ s, le temps mort entre deux acquisitions est de 6 μ s.

ANNEXE VIII

Filtre et amplificateur LNA

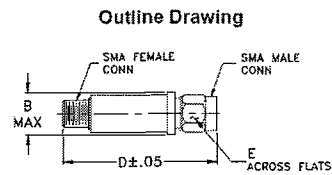
Coaxial High Pass Filter

50Ω 1900 to 4750 MHz

Maximum Ratings

Operating Temperature	-55°C to 100°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
RF Power Input*	7W max. at 25°C

* Passband rating, derate linearly to 3W at 100°C ambient. Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.



Outline Dimensions (inch)

B	D	E	wt
.410	1.43	.312	grams
10.41	36.32	7.92	10.0

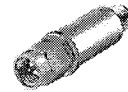
Features

- rugged unibody construction, small size
- 7 sections
- temperature stable
- excellent power handling, 7W
- low cost

Applications

- sub-harmonic rejection and dc blocking
- transmitters/receivers
- lab use

VHF-1810+
VHF-1810



CASE STYLE: FF704

Connectors	Model	Price	Qty.
SMA	VHF-1810(+)	\$24.95 ea.	(1.9)

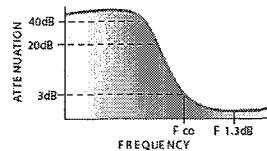
* RoHS compliant in accordance with EU Directive (2002/95/EC)

The * Suffix identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications.

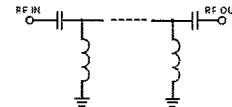
Electrical Specifications (T_{AMB} = 25°C)

STOP BAND (MHz)	f _{co} , MHz	PASSBAND (MHz)	VSWR (:1)	NO. OF SECTIONS
Min.	Nom.	Typ.	Typ.	
(loss > 40 dB)	(loss < 3 dB)	(loss < 1.3 dB)	Frequency (MHz)	
1100	1610	2250-4000	20:1	7
1480	Typ.	1900-4750	Stopband	
			1.5:1	

typical frequency response

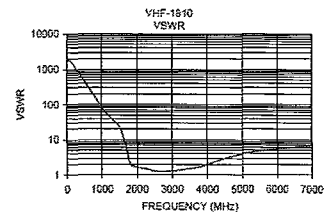
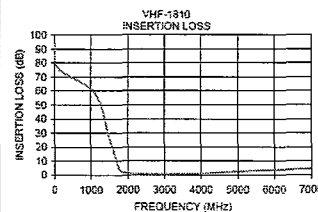


electrical schematic



Typical Performance Data

Frequency (MHz)	Insertion Loss (dB)	VSWR (:1)
1	94.72	1737.18
100	76.19	1737.18
1100	58.71	62.05
1480	27.69	25.56
1630	13.76	11.24
1730	6.11	3.98
1810	2.86	1.95
1900	1.84	1.76
2250	0.90	1.51
2750	0.55	1.27
3750	0.74	1.53
4000	1.03	2.07
4750	2.13	3.48
5500	3.10	4.88
7000	4.35	6.94



Coaxial

Low Noise Amplifier

ZX60-242GLN+

50Ω

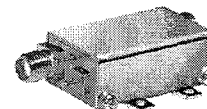
1710 to 2400 MHz

Features

- Ultra low noise figure, 0.85 dB typ.
- High gain, 30 dB typ.
- Output power, up to +20 dBm typ.
- Good output IP3, 36.5 dBm typ.
- Unconditionally stable
- Protected by US patent 6,790,049

Applications

- Base transceiver station, tower mounted amplifier, repeater
- WCDMA
- TD SCDMA
- PCS Rx / PCS Tx
- General purpose low noise amplifier
- Lab
- Instrumentation
- Test equipment



Case Style: GA955

Connectors	Model	Price	Qty.
SMA	ZX60-242GLN-S+	\$49.95 ea.	(1-9)

+ RoHS compliant in accordance with EU Directive (2002/95/EC)

The +Suffix has been added in order to identify RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications.

Electrical Specifications at 25°C

Parameter	Condition (MHz)	Min.	Typ.	Max.	Units
Frequency Range		1710		2400	MHz
Noise Figure	1710 - 1880		0.80	1.05	dB
	1850 - 1990		0.80	1.05	
	1990 - 2200		0.90	1.10	
	2200 - 2400		0.90	1.20	
Gain	1710 - 1880	28.0	31.0		dB
	1850 - 1990	28.0	30.5		
	1990 - 2200	26.5	29.5		
	2200 - 2400	25.5	28.0		
Gain Flatness	1710 - 1880		± 0.60	± 1.20	dB
	1850 - 1990		± 0.50	± 1.00	
	1990 - 2200		± 0.70	± 1.40	
	2200 - 2400		± 0.65	± 1.30	
Output Power at 1dB compression	1710 - 1880	18.0	20.0		dBm
	1850 - 1990	18.0	20.0		
	1990 - 2200	18.0	20.5		
	2200 - 2400	18.5	21.0		
Output third order intercept point	1710 - 1880		36		dBm
	1850 - 1990		36		
	1990 - 2200		37		
	2200 - 2400		37		
Input VSWR	1710 - 1880		1.4		:1
	1850 - 1990		1.3		
	1990 - 2200		1.2		
	2200 - 2400		1.7		
Output VSWR	1710 - 1880		1.3		:1
	1850 - 1990		1.3		
	1990 - 2200		1.5		
	2200 - 2400		1.7		
Active Directivity	1710-2400		11.5		dB
DC Supply Voltage			5.0		V
Supply Current			120	150	mA

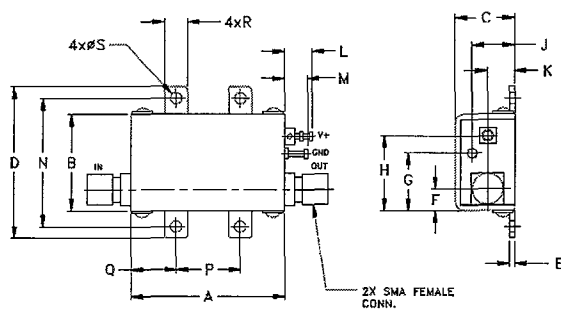
ZX60-242GLN+

Maximum Ratings

Parameter	Ratings
Operating Temperature	-40°C to 85°C Case
Storage Temperature	-55°C to 100°C
DC Voltage	5.5 V
Input RF Power (no damage)	+17 dBm
Power Consumption	825 mW

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

Outline Drawing



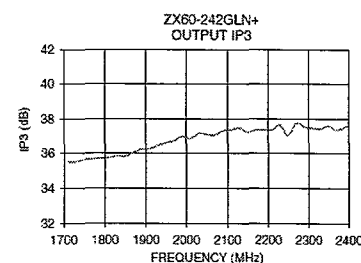
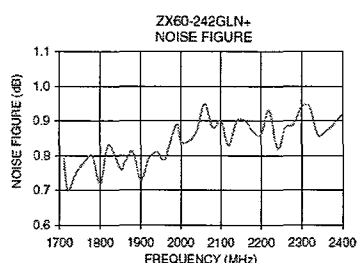
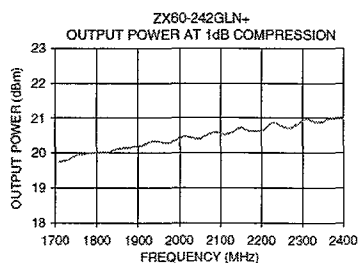
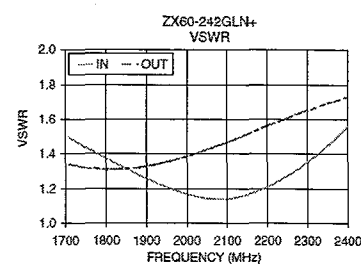
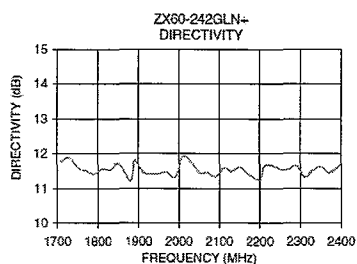
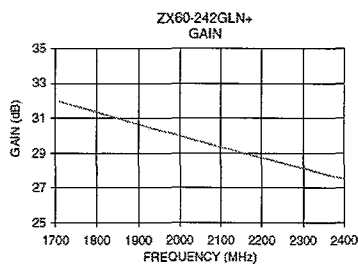
Outline Dimensions (inch)

A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q	R	S	WL
1.20	.75	.46	1.18	.04	.17	.45	.59	.33	.21	.22	.18	1.00	.50	.35	.18	.106	grams
30.48	19.05	11.68	29.97	1.02	4.32	11.43	14.99	8.38	5.33	5.59	4.57	25.40	12.70	8.89	4.57	2.69	35.0

Typical Performance Data/Curves

ZX60-242GLN+

FREQUENCY (MHz)	GAIN (dB)	DIRECTIVITY (dB)	VSWR IN (:1)	VSWR OUT (:1)	POWER OUT @ 1dB COMPRESSION (dBm)	OUTPUT IP3 (dBm)	NF (dB)
1710.00	31.97	11.78	1.49	1.34	19.75	35.52	0.79
1750.00	31.68	11.59	1.44	1.32	19.94	35.65	0.77
1800.00	31.35	11.52	1.38	1.31	20.00	35.59	0.72
1850.00	31.00	11.72	1.32	1.32	20.12	35.86	0.76
1880.00	30.79	11.22	1.28	1.32	20.16	36.17	0.81
1900.00	30.66	11.28	1.26	1.33	20.21	36.29	0.73
1950.00	30.32	11.43	1.21	1.35	20.33	36.62	0.80
1990.00	30.05	11.33	1.18	1.38	20.35	36.98	0.89
2040.00	29.73	11.88	1.15	1.42	20.41	37.15	0.87
2060.00	29.60	11.50	1.14	1.43	20.45	37.00	0.95
2100.00	29.35	11.54	1.14	1.47	20.56	37.23	0.90
2140.00	29.09	11.53	1.16	1.51	20.68	37.23	0.90
2180.00	28.85	11.36	1.19	1.54	20.60	37.44	0.87
2200.00	28.73	11.25	1.21	1.56	20.64	37.37	0.86
2260.00	28.37	11.50	1.29	1.62	20.72	37.31	0.88
2300.00	28.12	11.35	1.35	1.65	20.90	37.52	0.84
2320.00	28.00	11.66	1.39	1.67	20.93	37.29	0.94
2360.00	27.75	11.73	1.47	1.70	20.95	37.42	0.87
2380.00	27.63	11.76	1.51	1.72	20.98	37.18	0.89
2400.00	27.50	11.72	1.56	1.73	20.97	37.63	0.92



ANNEXE IX

Réponse fréquentielle de l'antenne Wi-Fi 2.4 GHz D-Link

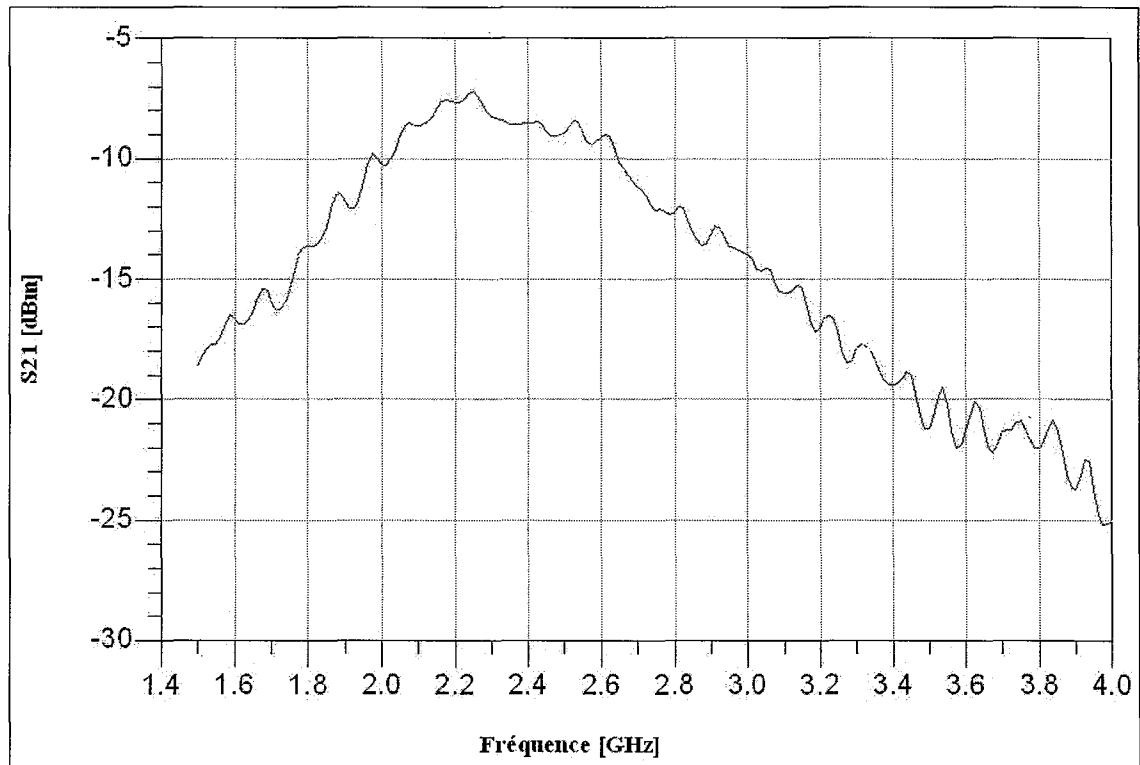


Figure-A IX-1

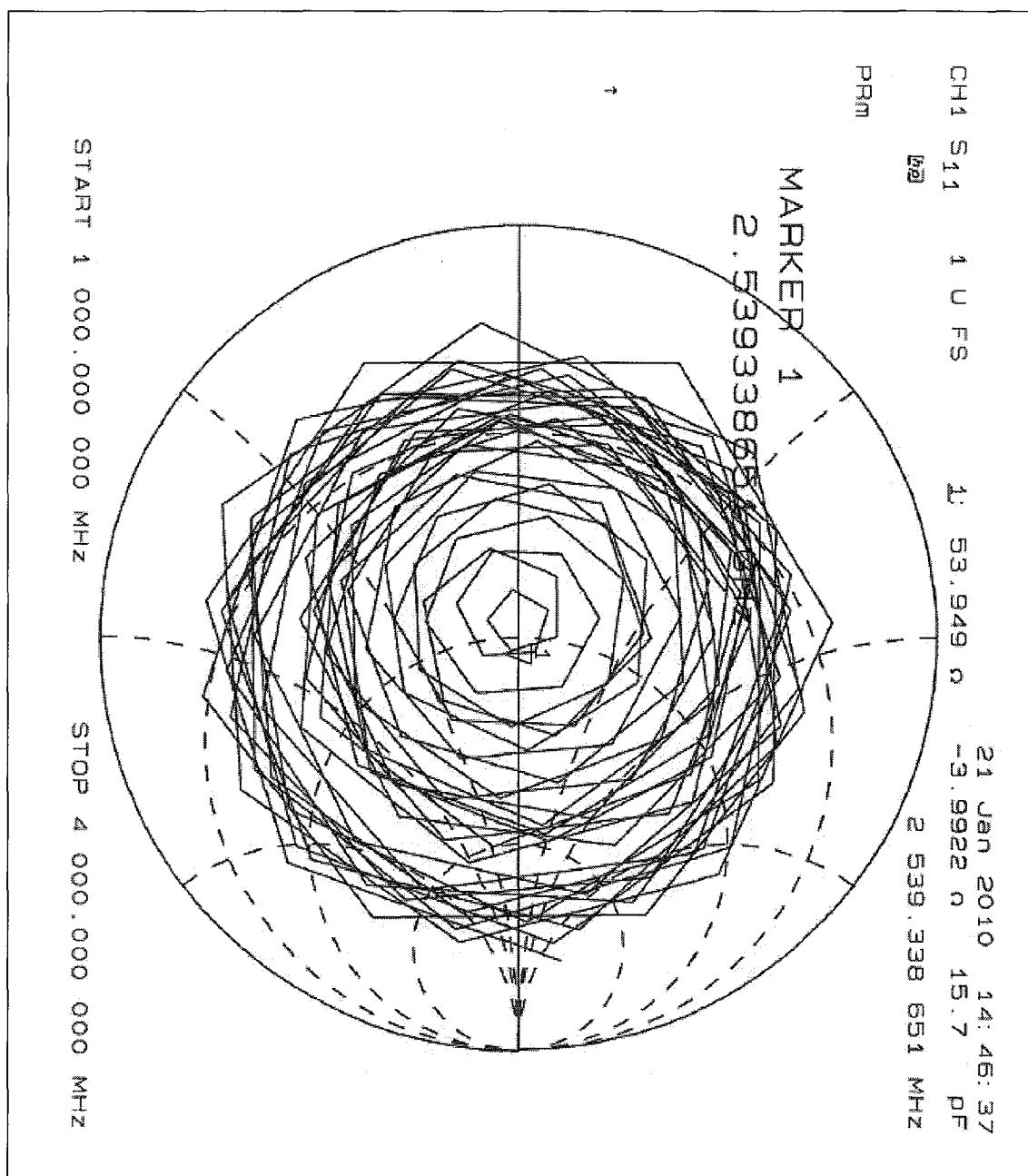


Figure-A IX-2

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] H.M. Loue, K.J. Brazier, Y. Huang, P.F. Coventry, and G.R. Jones, (2004), High-Frequency Effects in SF₆ Circuit Breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 3, pp. 472–479.
- [2] S. Nikolovski, P. Maric, Z. Baus, B. Stefic, (2007). Computation of Electromagnetic Field of Transformer Poste 110/10(20) kV Using the CDEGS software. *EUROCON 2007 The International Conference on "Computer as a Tool"*.
- [3] Y. Shangzun, L. Pengfei, N. Ling, (2008). Study on Electromagnetic Radiation of Ultra-High Voltage Power Transmission Line. *International Conference on Computer Science and information Technology*
- [4] M.M. Rao, M. J. Thomas, and B.P. Singh, (2007). Electromagnetic Field Emission From Gas-to-Air Bushing in a GIS During Switching Operations. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 49, No. 2.
- [5] D.E. Thomas, C.M. Wiggins, P.S. Nickel, C.D. Ko, S.E. Wright, (1989). Prediction of Electromagnetic Field and Current Transients in Power Transmission and Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 1.
- [6] M. Hikita, H. Yamashita, T. Hoshino, T. Kato, N. Hayakawa, T. Ueda, H. Okubo, (1998). Electromagnetic Noise Spectrum Caused by Partial Discharge in Air at High Voltage Substation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No. 2.
- [7] R.G. Olsen, and B.O. Stimson, (1988), Predicting VHF/UHF Electromagnetic Noise from Corona on Power-Line Conductors. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 30, No. 1.
- [8] W.E. Pakala, E.R. Taylor, and R.T. Harrold (1968). Radio Noise Measurements on High Voltage Lines from 2.4 to 345 kV. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 10, pp. 96-107.
- [9] J.S. Pearson, B.F. Hampton, and A.G. Sellars (1991). A Continuous UHF Monitor for Gas-insulated Substations. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 26, No. 3.
- [10] W.E. Pakala, and V.L. Chartier (1971). Radio noise measurements on overhead power lines from 2,4 to 800 kV. *IEEE Transactions on Power Applications and Systems*, Vol. PAS-90, pp. 1155-1165.
- [11] R. T. Carter, A. W. Grille, G. M. Bazile, N. D. Perkins, S. F. Mauser (1987), Analysis of

Radio Interference And Substation modifications For Upgrading a 115 kV Substation to 230 kV, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 2.

- [12] J.E. Beattie, P.L. Tempel (1995) Bruit THF émis par les lignes de transport et les postes, SASPOWER.
- [13] P I Moore, I A Glover (2003), Characterisation of radio Interference from high voltage electricity Supply Equipment, The Institution of Electrical Engineers.
- [14] S. Tenbohlen, D. Denisov and S. M. Hoek (2008), Partial Discharge Measurement in the Ultra High Frequency (UHF) Range, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15, No. 6
- [15] LI Jun-hao, SI Wen-rong, YUAN Peng, LI Yan-mu, LI Yan-ming (2008), Propagation Characteristic Study of Partial Discharge UHF Signal outside Transformer, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing.
- [16] An American National Standard (1986), IEEE Standard Procedures for the Measurement of Radio Noise from Overhead Power Lines and Substations, Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society.
- [17] S. Minegishi, H. Echigo, R. Sato (1989), Frequency Spectra of the Arc Current Due to – Opening Electric Contacts in Air, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 31, No. 4
- [18] M. Paede, W. Pfeiffer (2002), About the PD-Testing of Insulation Systems with High-Frequency Voltages, Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation.
- [19] T. Babnik, R.K. Aggarwal, P. J. Moore and Z.D. Wang, (2003), Radio Frequency Measurement of Different Discharges, IEEE Bologna PowerTech Conference, June 23-26, Bologna, Italy.
- [20] Masatake Kawada, Katsuo Isaka, (2008), Time-Frequency Analysis of EM Waves Emitted from Consecutive PD Pulses Using the Constrained Interpolation Profile (CIP) Method and the In-Place Fast Haar Wavelet Transform, 2008 IEEE.
- [21] F. Cleveland, (2006), Use of Wireless data Communication in Power System Operations, EPRI Report, IEEE.
- [22] Jian Li', S. Grzybowski, Lin Du', Youyuan Wang', (2006), Extraction of Partial Discharges from Noises by Use of Wavelet and Pulse-Sequence Analysis, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE.
- [23] K. L. Wong, (2006), Electromagnetic Emission Based Monitoring Technique

for Polymer ZnO Surge Arresters, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 13, No. 1.

- [24] Hédio Tatizawa, Kleiber T. Soletto, Wilson R. Bacega, (2008), Proposal of a Partial Discharge Detection Method for Laboratory and Field Conditions, IEEE.

